



**Schnaider Wasnate
Gomes Mansoa**

**Cogeração solar doméstica com utilização de motor
Stirling e sua comparação com sistema
fotovoltaico/solar térmico**



**Schnaider Wasnate
Gomes Mansoa**

**Cogeração solar doméstica com utilização de motor
Stirling e sua comparação com sistema
fotovoltaico/solar térmico**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica de Fernando José Neto da Silva, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

o júri / the jury

presidente / president

Professor Doutor Nelson Amadeu Dias Martins

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

arguente

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Associado da Universidade de Aveiro

orientador

Professor Doutor Fernando José Neto da Silva

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

**agradecimentos /
acknowledgements**

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Fernando José Neto da Silva, por toda a ajuda e compreensão que demonstrou ao longo deste trabalho.

Desejo também agradecer à minha esposa e melhor amiga, Cláudia Mansoa, pelo apoio constante e amor incondicional

Agradeço ao meu filho, cuja simples existência serve de incentivo e encorajamento diário.

Um agradecimento especial ao Ricardo Nuno Leitão Grave, ao Rui Miguel J. R. Ribeiro e a todos os meus colegas da manutenção pelo apoio e palavras de encorajamento.

Quero também agradecer ao José Carlos Martins Ramalho pela ajuda prestada e pela sua amizade.

Finalmente, agradeço aos meus sogros, Manuel Marques Cunha e Maria Gracinda Figueira Afonso.

Resumo

Neste trabalho é concretizada uma análise comparativa entre um sistema de cogeração composto por um disco parabólico e motor stirling e a produção separada de eletricidade e calor com recurso a painéis fotovoltaicos e painéis solares térmicos, no âmbito doméstico.

É feita uma breve apresentação das tecnologias e algumas das suas aplicações mais relevantes. É também explicado o conceito de cogeração. O trabalho terá enquadramento em Portugal, pelo que é necessário apresentar a legislação aplicável em ambos os casos.

A análise comparativa, é feita com base nos resultados das simulações efetuadas no System Advisor Model (SAM), desenvolvido pela NREL. Os dados das temperaturas do fluido de refrigeração provenientes da simulação do motor Stirling são usados para determinar energia térmica disponível para pré aquecimento de água quente.

A modelação mostra que existe potencial de redução da energia necessária para os requisitos de aquecimento estipulados por lei, usando o fluido de arrefecimento para pré aquecimento da água. Este fator contribui para uma redução do retorno do investimento.

O estudo revela que existe uma grande diferença no custo de investimento, $1130\text{€}/\text{kW}$ no caso mais caro de um sistema de painéis fotovoltaicos e painéis solares térmicos, contra $39644\text{€}/\text{kW}$ no caso do sistema de cogeração com Stirling. A menor diferença entre o retorno do investimento dos modelos é de três anos, 7,9 na produção separada e 10,6 na cogeração. Uma redução de 30% no custo de investimento tornaria a cogeração uma opção competitiva no terceiro caso, o caso de uma habitação com 5 pessoas e potência contratada de $6,9\text{kVA}$.

A cogeração torna-se interessante quanto maior for o consumo elétrico da habitação. A legislação permite a venda do excedente da energia elétrica produzida, e o produtor/consumidor, após investimento inicial, apenas se preocupa com os custos de manutenção e a compensação que tem de ser paga às autoridades, que depende da potência da tecnologia instalada. Outro ponto a favor da cogeração é o fato de não existirem as mesmas limitações de potência máxima instalada ou produção elétrica máxima permitida, presentes na legislação que rege os sistemas fotovoltaicos.

Um ponto que pode demover possíveis investidores é o já mencionado elevado custo de investimento.

Também é relevante considerar que, apesar de ser possível vender excedente de energia térmica, esta opção não é considerada neste trabalho. Isto porque a quantidade de energia térmica disponível não chega para suprir as necessidades de aquecimento da instalação produtora.

Abstract

This work makes a comparative analysis between cogeneration using a parabolic dish and a Stirling engine and production of heat and electricity using solar thermal panels and photovoltaic technology in household applications.

This work makes an overview of the technologies and their most relevant applications. It is also presented the concept of cogeneration. Since this work is applied to Portugal, the regulations and laws for both cases are also mentioned in this work.

The comparative analysis based on the results obtained from simulations of the System Advisor Model (SAM), developed by NREL. The data from the cooling fluid temperature given by the Stirling model performance is used to calculate the thermal potential available to pre heat water.

The model shows that it is possible to use the cooling fluid to pre heat the water, thus reducing the energy required to meet the hot water requirements defined by the legislation. This reduces the system payback. The study shows that there is a big difference in the investment cost, the most expensive case for photovoltaics and solar heating being 1130€/kW, and the Stirling cogeneration system being 3964€/kW. The minimum payback difference between both models is three years, 7,9 years in the photovoltaic model and 10,6 in the Stirling cogeneration. Reducing 30% in the investment cost would make the Stirling cogeneration system a competitive option in the third case, a household with five people and 6,9kVA apparent power.

The cogeneration system is best used with greater electrical consumptions of the household. The legislation allows electrical energy surplus to be sold and, apart from the initial cost, the producer/consumer only has to worry about the maintenance expenses and the compensation that has to be paid to the authorities which depends on the total system power. Another favourable aspect is the fact that the installed power limitations and the maximum allowed electrical production, for the photovoltaic systems are not the same for the cogeneration systems.

One of the main issues that could demote potential investors is the already mentioned high investment cost.

It is also important to refer that, although it is possible to sell the electrical and thermal energy surplus, the option is not considered in this work. The reason being the available thermal energy is not enough to supply the needs of the producer household.

Conteúdo

Conteúdo	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1 Introdução e Objetivos	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Estrutura da Dissertação	1
2 Estado da arte	3
2.1 Tecnologia de Stirling	3
2.1.1 Origem do motor de Stirling	3
2.1.2 Princípio de funcionamento do Motor de Stirling	4
2.1.3 Diferentes Configurações	7
2.1.4 Tipologia	9
2.1.5 Aplicações Existentes	10
2.2 Uso de Motor Stirling em Sistemas Parabólicos Solares	11
2.3 Tecnologia Fotovoltaica	15
2.3.1 Funcionamento	15
2.3.2 Visão histórica	15
2.3.3 Alguns avanços recentes	16
2.4 Cogeração	18
2.4.1 Microcogeração	18
2.4.2 Cogeração em Portugal	19
3 Legislação	23
3.1 Legislação para a produção descentralizada de energia elétrica	23
3.1.1 Objetivos principais do decreto	23
3.1.2 Definições gerais	24
3.1.3 Regime de Pequena Produção	26
3.1.4 Autoconsumo	27
3.2 Cogeração	29
3.2.1 Objetivos Principais	29
3.2.2 Definições Gerais	30
3.3 Regime remuneratório da produção em cogeração	33
3.3.1 Modalidade especial do regime remuneratório	33

3.3.2	Modalidade geral do regime remuneratório	35
3.4	Cálculo da eletricidade produzida em cogeração	39
3.5	Cálculo da poupança de energia primária	40
3.6	Avaliação custo-benefício	41
3.6.1	Análise custo-benefício para Estudo do potencial de cogeração de elevada eficiência em Portugal	41
3.6.2	Análise custo-benefício para títulos de controlo prévio e licenças de produção em cogeração	41
3.7	Regimes considerados na simulação	42
4	Software de Simulação	43
4.1	Estudos de caso e validação dos modelos da ferramenta de simulação	43
4.1.1	Modelo do Sistema fotovoltaico	43
4.1.2	Modelo Solar térmico	47
4.1.3	Modelo da Concentração solar com recurso a um espelho parabólico e recurso à tecnologia Stirling	49
5	Modelação e análise comparativa	53
5.1	Considerações	53
5.2	Apresentação do estudos de Caso	56
5.3	Autoconsumo Fotovoltáico	57
5.4	Pequena Produção Fotovoltaica	59
5.5	Solar Térmico	60
5.6	Cogeração Stirling	62
5.7	Retorno do Investimento	64
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	67
6.1	Conclusões e Trabalhos futuros	67
6.1.1	Trabalhos Futuros	67
A	Valores Tabelados	69
A.1	preços de componentes usados nas simulações	69
A.2	Preços Tarifa Bi-horária	69
B	Tabelas de Resultados	70
	Bibliografia	75

Lista de Figuras

2.1	ciclo de Stirling	5
2.2	Diagramas P-v e T-s	6
2.3	Configuração Alfa	7
2.4	Motor Solo Kleinmotoren V-160, configuração alfa, da Stirling Power Systems	8
2.5	Configuração Beta	8
2.6	Configuração Gama	9
2.7	Motor Stirling Cinemático (Beta)	10
2.8	Motor Stirling Pistão Livre	10
2.9	Sistema disco/Stirling 50kW, Arabia Saudita	11
2.10	Motor Stirling V2-6 da INRESOL TM	12
2.11	GENIOUS Portable Multi Fuel CHP Stirling Generator	13
2.12	Seguidor solar GENIOUS	13
2.13	Unidade contentora GENIOUS [32]	14
2.14	Sistema de monitorização <i>Cloud</i>	15
2.15	Duas versões em escala pequena dos painéis fotovoltaicos 3D usados por Jeffrey Grossman e sua equipa no telhado do MIT para medir a sua produção elétrica diária	17
2.16	Esquema de um sistema de microcogeração	19
2.17	Consumo de energia por alojamento desagregado por uso final	20
2.18	Consumo para aquecimento por m^2	20
4.1	Erro anual (modelação-medições) do modelo <i>Detailed Photovoltaic</i> usando diferentes módulos e modelos de irradiação	45
4.2	Raiz do erro quadrático médio horário das diferentes ferramentas de modelação	45
4.3	Esquema do modelo de Água Quente Solar usado pelo SAM	48
5.1	Consumo unitário de energia por habitação, em Portugal (tep/habitação) . .	53
5.2	Consumo unitário de eletricidade por habitação em Portugal (kWh/habitação)	54
5.3	Clima em Portugal, de acordo com a Classificação climática de Köppen	55
5.4	Excerto da Recolha dos valores das temperaturas do fluido de arrefecimento, para a cidade de Bragança (1 ano)	63
5.5	Retorno do Investimento (<i>payback</i>) médio nos três casos (anos)	65
5.6	Custo da tecnologia (€/kW)	65
5.7	Investimento inicial médio nos três casos	66

Lista de Tabelas

4.1	Perdas definidas por defeito (Modelo <i>Detailed Photovoltaic</i>).	47
4.2	Comparação do erro médio de viés.	49
4.3	Comparação da diferença média da potência para os três modelos.	50
5.1	Categorização do clima das localidades disponíveis na ferramenta de simulação, correspondente total de horas de sol e potências de produção elétrica mínimas necessárias.	56
5.2	Consumos anuais para cada estudo de caso considerado	57
5.3	Módulo fotovoltaico AC-250P/156-60S - Dados (em condições padrão) irradiância 1000 watt/m ² , temperatura da célula - 25°C	57
5.4	Dados dos inversores usados na simulação	58
5.5	Potência máxima permitida para Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) e potência instalada, para cada caso	58
5.6	Caso 1 - Modelação fotovoltaica	58
5.7	Caso 2 - Modelação fotovoltaica	59
5.8	Caso 3 - Modelação fotovoltaica	59
5.9	Potência instalada para as Unidades de Pequena Produção (UPP)	59
5.10	Caso 1 - Modelação fotovoltaica (UPP)	60
5.11	Caso 2 - Modelação fotovoltaica (UPP)	60
5.12	Caso 3 - Modelação fotovoltaica (UPP)	60
5.13	Características técnicas do coletor solar (ver Apêndice A)	61
5.14	Caso 1 - Modelação do sistema solar térmico	61
5.15	Caso 2 - Modelação do sistema solar térmico	61
5.16	Caso 3 - Modelação do sistema solar térmico	61
5.17	Características técnicas do motor Stirling GENIOUS™ V2-6 da INRESOL.	62
5.18	Modelação do Sistema de cogeração Stirling para os três casos	62
5.19	Energia Térmica anual rejeitada pelo sistema	64
5.20	Custo da tecnologia (€/kW)	64
5.21	Retorno do Investimento médio nos 3 casos (UPP e UPAC sem seguidor solar) (anos)	65
A.1	Preço unitário por artigo	69
A.2	Preços Tarifa Bi-horária	69

Símbolos

η Rendimento (%)

η_{Carnot} Rendimento do ciclo ideal de Carnot (%)

t Temperatura (°C)

\dot{m} caudal (kg/s)

C_p calor específico (J/kg.K)

θ Ângulo (graus)

I Corrente (Ampère)

Q Carga (Ampère-hora)

f Frequência (Hertz)

kWh_e Energia elétrica (Wh_{el})

kW_t Potência Térmica (kW)

MPa Pressão (10^6 Pascal)

V Tensão (Volt)

VAC Tensão corrente alternada (Volt)

T Temperatura absoluta (Kelvin)

$T_{q,ent}$ Temperatura à entrada da fonte fria (Kelvin)

$T_{q,sai}$ Temperatura à saída da fonte fria (Kelvin)

Pot_a Potência aparente (Volt-Ampère)

Q_c Calor transferido na Compressão (Watt)

Q_e Calor transferido na Expansão (Watt)

Pot Potência (Watt)

W_c Trabalho de Compressão (Watt)

W_e Trabalho de Expansão (Watt)

E Energia (Wh)

Abreviaturas

AC Corrente Alternada

AQS Água Quente Sanitária

AT Alta Tensão

BT Baixa Tensão

BTE Baixa Tensão Especial

BTN Baixa Tensão Normal

CIEG Custos decorrentes de medidas de política energética de sustentabilidade ou de Interesse Económico Geral

CPD Cogeração de Pequena Dimensão

CUR Comercializador de Último Recurso

DC Corrente contínua

DGEG Direção Geral de Energia e Geologia

EEGO Entidade Emissora de Garantias de Origem

ERSE Entidade Reguladora de Serviços Energéticos

MAT Muito Alta Tensão

MT Média Tensão

ORD Operador da Rede de Distribuição

ORT Operador da Rede de Transporte

RESP Rede Elétrica de Serviço Público

RND Rede Nacional de Distribuição

RNT Rede Nacional de Transporte de Energia Elétrica

rpm rotações por minuto

SEN Sistema Elétrico Nacional

SERUP Sistema Eletrónico de Registo da UPAC e da UPP

UP Unidade de Produção

UPAC Unidade de Produção para Autoconsumo

UPP Unidades de Pequena Produção

Capítulo 1

Introdução e Objetivos

1.1 Enquadramento

Com os avanços tecnológicos das últimas décadas, os motores Stirling tornaram-se uma tecnologia com reconhecido valor em várias áreas.

A principal área de estudo é, sem dúvida, o uso desta tecnologia para produção de energia elétrica. Visto que funcionam com qualquer tipo de combustível, os motores Stirling podem ser usados com fontes de energia renovável, como a energia solar. Esta capacidade faz com que estes motores sejam vistos como uma possível solução, tanto para as necessidades energéticas como para a crescente necessidade de redução dos gases de estufa, provenientes da combustão de combustíveis fósseis.

Comparativamente com a tecnologia fotovoltaica, o motor Stirling tem um rendimento superior. Mas a maior vantagem da tecnologia Stirling é o fato de ser possível usar o mesmo sistema para produzir eletricidade e calor em simultâneo, chamado de cogeração.

A cogeração com recurso à tecnologia Stirling já é usada em vários países, no âmbito doméstico, em sistemas de micro-cogeração. A maioria dos casos é com recurso a combustíveis fósseis.

Pretende-se com este trabalho, analisar, para o caso doméstico, o desempenho energético da tecnologia Stirling com recurso a uma fonte renovável, a energia solar, no clima Português. O uso de uma fonte de energia renovável remove o custo de combustível, o que potencia a redução do retorno do investimento.

Outro objetivo deste trabalho é identificar os apoios e as limitações legislativas da cogeração com recursos renováveis em Portugal e determinar se e quando é vantajoso recorrer a esta tecnologia.

1.2 Estrutura da Dissertação

No capítulo 1 é feito o enquadramento do trabalho e apresentada a relevância da tecnologia Stirling. O enquadramento serve para estabelecer o objetivo do trabalho. É apresentada também a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a história da tecnologia Stirling, a sua origem, funcionamento, evoluções tecnológicas e exemplos de aplicações. Posteriormente é apresentada a história e desenvolvimento dos painéis fotovoltaicos e da tecnologia solar térmica. A cogeração será o último tema abordado, e serão dados alguns exemplos, a maioria com tecnologia Stirling.

O capítulo 3 faz um enquadramento legal da Cogeração e da produção separada de eletricidade e calor em Portugal. Este capítulo é relevante, pois a análise económica depende da legislação vigente. Destacam-se as definições mais importantes e as equações usadas.

O capítulo 4 analisa o programa de simulação. Começa por apresentar as diferentes opções de modelação fotovoltaica relevantes para o trabalho, depois apresenta os estudos de validação dos modelos e por fim compara os valores definidos por defeito no caso do modelo fotovoltaico escolhido para a simulação. É depois analisado o modelo Stirling usado pelo software e são apresentadas conclusões relativas à aproximação dos modelos aos casos reais.

O capítulo 5 é relativo à modelação. O estudo de caso é apresentado, adaptado para a realidade de Portugal, com base em dados de consumos de referência. Depois, são enunciados os pressupostos usados para as simulações, os ajustes feitos e o cálculo do retorno do investimento para os diferentes casos e principais resultados.

O capítulo 6, apresenta as conclusões, e pontos de análise que poderão ser usados em trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

2.1 Tecnologia de Stirling

O motor de Stirling não é uma tecnologia recente. Trata-se de um motor de combustão externa, que usa ar ou outro gás como fluido operante. Por se tratar de um motor de combustão externa, uma grande variedade de combustíveis pode ser usado na fonte quente. O calor excedente da fonte externa e o calor rejeitado na fonte fria do motor podem ser usados para aquecimento de águas sanitárias. Esta configuração é conhecida como cogeração. O conceito é abordado neste capítulo e alguns exemplos são mostrados.

Tanto a estrutura como o funcionamento do motor Stirling são simples. As razões acima referidas, fazem com que esta seja uma tecnologia versátil e uma alternativa muito atrativa.[1]

2.1.1 Origem do motor de Stirling

Em 1816, Robert Stirling inventou este motor. Era inicialmente usado para bombear água e tinha um tempo de vida longo (20 anos). Este motor era conhecido pela facilidade de uso, baixo ruído de funcionamento, facilidade de manutenção e segurança, especialmente quando comparado com o motor a vapor. No entanto, o motor de Stirling foi rapidamente substituído. O facto de ser um motor de grandes dimensões, ter uma baixa potência e um elevado custo inicial, fizeram com que esse motor caísse em desuso. O motor de combustão interna e o motor elétrico, que surgiram na década de 1920, tinham melhores performances nesses pontos[1].

Como na época o material usado no motor era ferro fundido, o motor de Stirling tinha a tendência de avariar por sobreaquecimento na zona da fonte quente. A solução encontrada foi alterar o design do queimador, o que resultou numa potência de funcionamento ainda menor.[1]

O avanço no estudo dos materiais, nomeadamente, no que diz respeito à utilização de aço inoxidável, e um melhor entendimento de processos termodinâmicos mais complexos resultou numa melhoria no rendimento do motor. O custo e o tamanho do motor foram reduzidos. Ainda assim, os países que desenvolveram a tecnologia, não consideravam a necessidade de usar este tipo de motor.

Na década de 80, a U.S. Agency for International Development (Agência dos Estados Uni-

dos para o Desenvolvimento Internacional), financiou a produção de motores Stirling para produção e uso nos países em desenvolvimento[1]. O motor foi produzido com sucesso, primeiro nos Estados Unidos e posteriormente no Bangladesh[1]. Isto provou ser possível a produção em fábricas dos vários países da África, Ásia e América latina[1].

Recentemente, alterações no design resultaram numa melhoria da relação peso-potência e eficiência do motor[1].

O baixo ruído de funcionamento, facilidade de manutenção, fiabilidade e durabilidade continuam a ser as principais características deste motor.

2.1.2 Princípio de funcionamento do Motor de Stirling

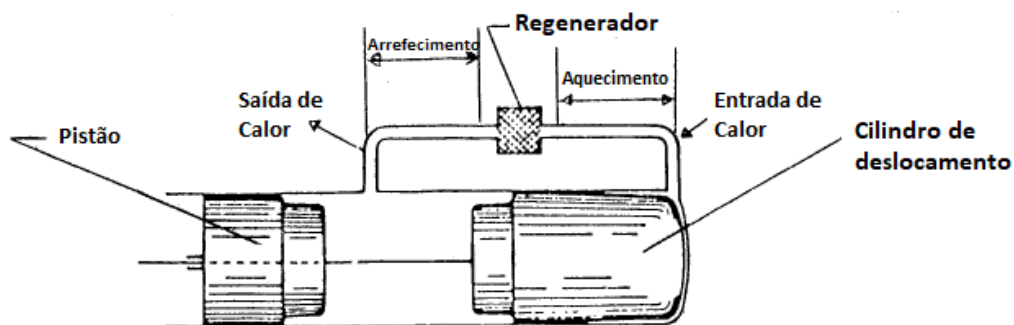
O motor Stirling é tipicamente composto por um pistão acoplado a um sistema biela-manivela, para transmissão de potência. Tem um cilindro de deslocamento, que pode ou não estar acoplado a um sistema biela-manivela e que contribui para o deslocamento do gás entre a fonte fria e a fonte quente. Tem também um regenerador, que ajuda no aquecimento e arrefecimento do fluido de trabalho.

Este motor funciona em ciclo fechado. O gás, normalmente ar, hidrogénio ou hélio, está selado no cilindro. É movido para a parte quente do cilindro onde, ao aquecer, expande. A sua pressão aumenta, deslocando o pistão e trabalho é efetuado.

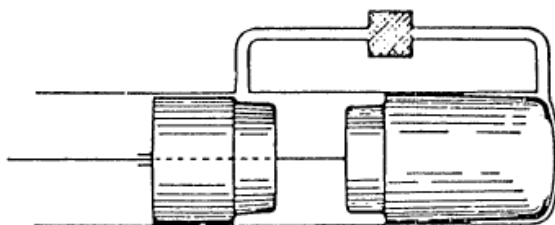
Ciclo Teórico

A **figura 2.1** apresenta as fases do ciclo de stirling bem como a configuração típica. O ciclo ideal do motor Stirling resume-se a quatro transformações termodinâmicas (**figura 2.2**):

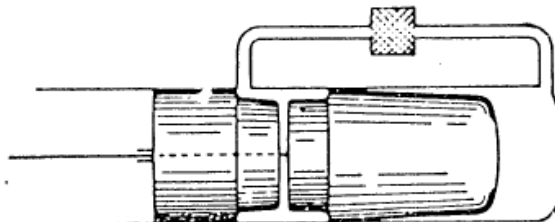
- Expansão isotérmica (1-2) - o espaço de expansão e o permutador de calor são mantidos a uma temperatura alta constante e o fluido de trabalho sofre uma expansão absorvendo calor da fonte quente. O sistema produz trabalho;
- Arrefecimento isocórico (2-3) - o fluido de trabalho passa pelo regenerador, onde arrefece, transferindo calor para o regenerador a ser utilizado no próximo ciclo;
- Compressão isotérmica (3-4) - o espaço de compressão e o permutador de calor são mantidos a uma temperatura baixa constante e o fluido de trabalho sofre uma compressão à custa de trabalho fornecido ao sistema, libertando calor para a fonte fria;
- Aquecimento isocórico (4-1) - o fluido de trabalho passa pelo regenerador, onde aquece, recuperando o calor do regenerador perdido durante o arrefecimento.



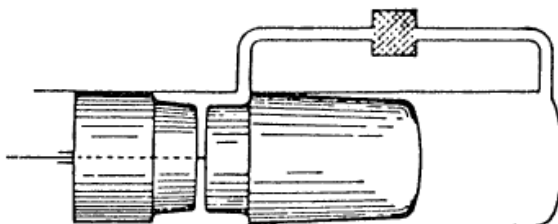
Fase 1: O pistão encontra-se no ponto morto inferior. O cilindro de deslocamento encontra-se no ponto morto superior e todo o gás está na zona fria do motor.



Fase 2: cilindro de deslocamento permanece no ponto morto superior. O pistão comprime o gás, à temperatura da zona fria do motor.



Fase 3: O pistão permanece no ponto morto superior. O cilindro de deslocamento desloca o gás através da zona de arrefecimento, do regenerador e da zona de aquecimento até à zona quente do motor.



Fase 4: Expansão do gás quente. O cilindro de deslocamento e o pistão deslocam-se para o ponto morto inferior em conjunto. Com o pistão no ponto morto inferior, o cilindro de deslocamento move o gás através da zona de aquecimento, regenerador e zona de arrefecimento, até à zona fria do motor. O ciclo volta ao início, à fase 1.

Source: G. Walker, Stirling Engines. (Oxford, England: Oxford University Press, 1980).

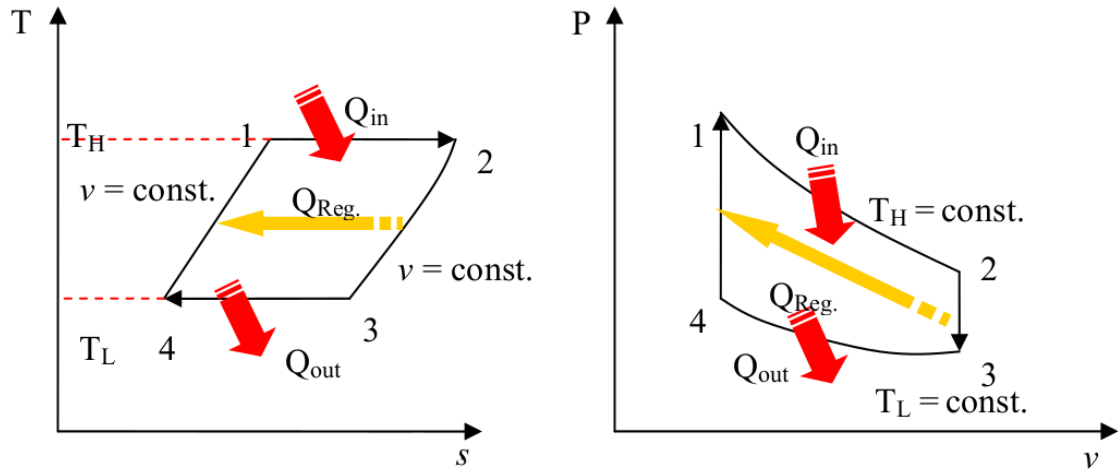


Figura 2.2: Diagramas P-v e T-s[2]

O calor transferido da zona de compressão e da zona de expansão são ambos função da pressão do motor, \mathbf{P} e do ângulo da biela, θ , como demonstrado pelas **equações 2.1 e 2.2** [3]. O calor da zona de expansão e o calor da zona de compressão equivalem ao trabalho de expansão e compressão, respetivamente. Estas grandezas são usadas para calcular o rendimento do motor, apresentado na **equação 2.3** e o trabalho total, apresentado na **equação 2.4**:

$$Q_c = W_c = \int P \frac{dV_c}{d\theta} d\theta \quad (2.1)$$

$$Q_e = W_e = \int P \frac{dV_e}{d\theta} d\theta \quad (2.2)$$

$$\eta_{Carnot} = \frac{W_{total}}{Q_e} \quad (2.3)$$

$$W_{total} = W_c + W_e \quad (2.4)$$

Regenerador

O primeiro regenerador, ou permutador de calor, foi patenteado por Robert Stirling, como componente do seu motor, para troca de calor entre dois fluidos, separados por uma parede sólida, a diferentes temperaturas. O regenerador melhora a eficiência do motor por pré-arrefecer o fluido de trabalho quando este se desloca da câmara de expansão para a de compressão e pré aquecer o fluido ao fazer o caminho inverso.

No caso de hidrogénio como fluido de trabalho, atingindo 700°C, a uma pressão de cerca de 20MPa, o motor atinge uma eficiência térmica de cerca de 40%[3]

Hoje em dia, o regenerador é mais conhecido e usado do que o próprio motor Stirling. É bastante usado em aquecimento de ambientes e condicionamento de ar, como sistemas AVAC, na produção de potência e recuperação de calor, como em turbinas a vapor em centrais termelétricas.[4]

2.1.3 Diferentes Configurações

Existem três configurações básicas do motor Stirling:

- O motor Stirling tipo Alfa (**figura 2.3**), é constituído por dois cilindros independentes, um na fonte quente e um na fonte fria. Este tipo de motor é caracterizado por ter uma elevada relação potência-volume. Existem, no entanto, alguns problemas técnicos no que diz respeito à durabilidade dos vedantes na fonte quente, causados pela elevada temperatura da mesma.

Os pistões movem-se de modo uniforme na mesma direção no processo de aquecimento/arrefecimento isocórico. Assim que todo o gás se encontra no mesmo cilindro, um pistão permanece fixo, enquanto o outro se desloca para o processo de expansão ou compressão. O trabalho de expansão é feito pelo pistão da fonte fria enquanto o trabalho de compressão é feito pelo pistão da fonte quente.

Um exemplo de um motor com esta configuração é o motor V-160 da Stirling Power Systems(**figura 2.4**).

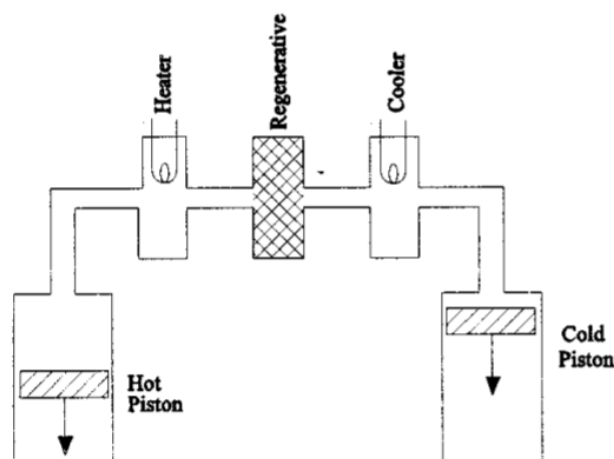


Figura 2.3: Configuração Alfa[5]

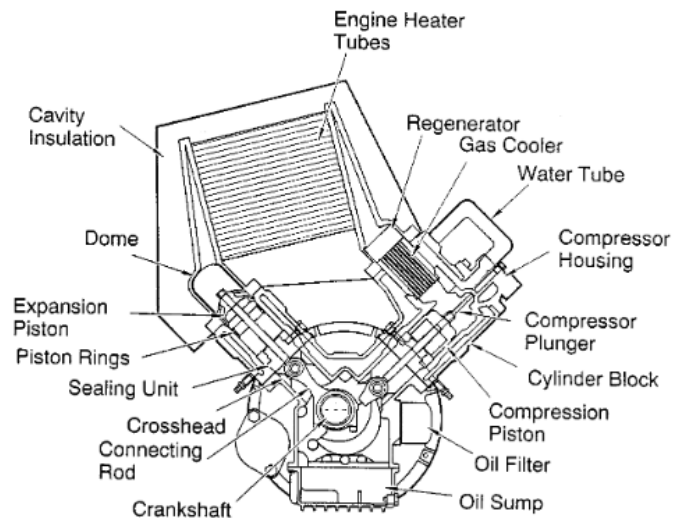


Figura 2.4: Motor Solo Kleinmotoren V-160, configuração alfa, da Stirling Power Systems[5]

- Um motor de Stirling do tipo Beta (**figura 2.5**) tem um pistão de potência e um pistão de deslocamento, em linha e no mesmo cilindro. O pistão de deslocamento é responsável apenas pelo deslocamento do fluido de trabalho entre a câmara quente e a câmara fria, enquanto o pistão de potência é responsável pelo trabalho de compressão e expansão, além de auxiliar no confinamento do fluido de trabalho no interior do motor. A patente original de Stirling era um motor com esta configuração.

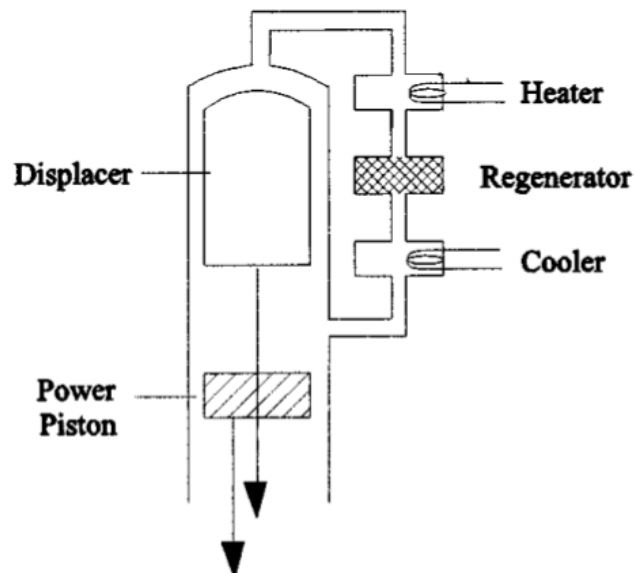


Figura 2.5: Configuração Beta[5]

- O motor Stirling do tipo Gama (**figura 2.6**) é constituído por um pistão de deslocamento como a configuração beta, mas tem dois cilindros independentes. O pistão de deslocamento move o fluido de trabalho entre as extremidades quente e fria dos cilindros. O pistão da fonte fria, pistão de trabalho, é responsável pelo trabalho do motor.

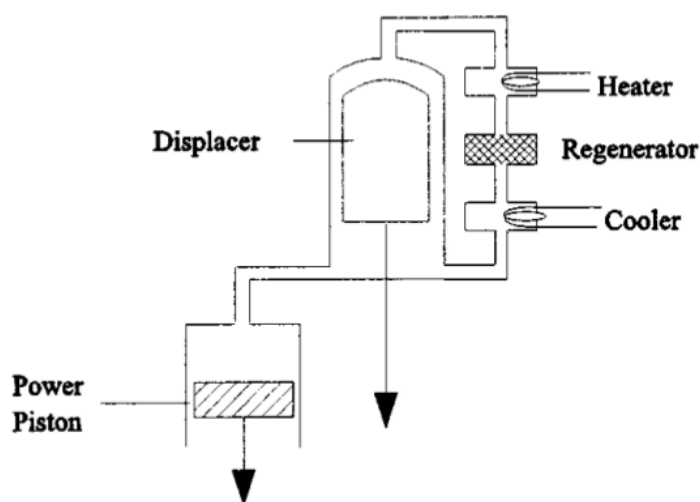


Figura 2.6: Configuração Gama[5]

2.1.4 Tipologia

Os motores Stirling são classificados em dois tipos: o cinemático e o "pistão-livre".

O motor cinemático têm o pistão ligado a uma manivela por uma biela.[5] Tem um selo para assegurar a separação das regiões de alta e baixa pressão e permitir lubrificação sem contaminação das câmaras. Estes motores são os usados atualmente no desenvolvimento de sistemas de disco Stirling (**figura 2.7**).

No caso dos motores Stirling de "pistão livre" (**figura 2.8**) não existe sistema biela-manivela, mas o pistão desloca-se alternativamente à custa do fluido operante e de uma mola (normalmente um gás funciona como mola). Um ímã é então acoplado ao pistão, gerando assim uma diferença de potencial.

Este motor, chamado motor Stirling de pistão-livre de Beale, foi desenvolvido por William Beale nas décadas de 60 e 70 do século passado.

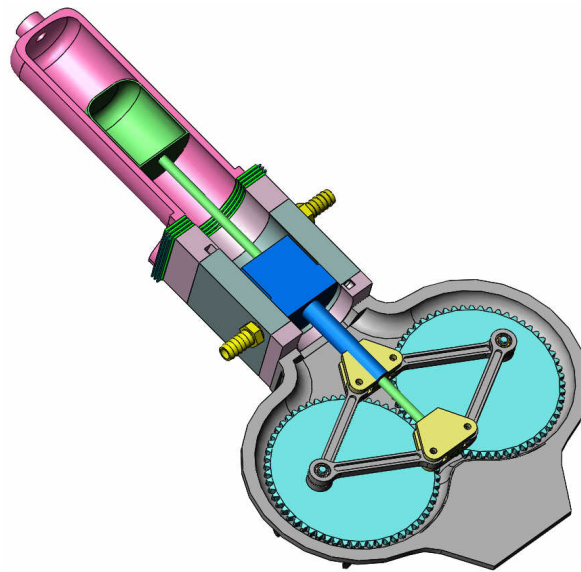


Figura 2.7: Motor Stirling Cinemático (Beta)[6]

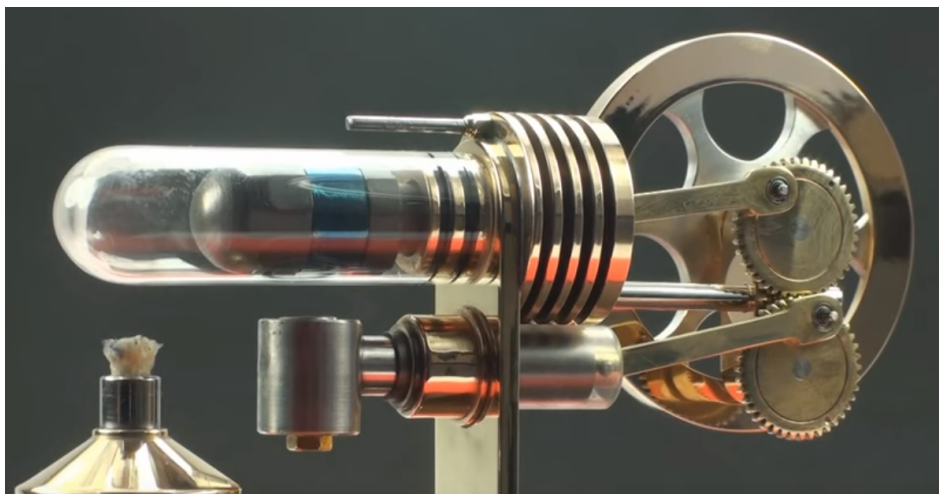


Figura 2.8: Motor Stirling Pistão Livre [7]

2.1.5 Aplicações Existentes

Em termos de aplicações para transporte, os motores Stirling têm sido maioritariamente desenvolvidos para uso em camiões, autocarros e barcos[8].

Foi também desenvolvido para uso em submarinos. A empresa Kockums[9, 10, 11] tem desenvolvido e vendido submarinos que recorrem ao motor Stirling como forma de propulsão.

A NASA considerou também a possibilidade de usar motores Stirling para sistemas de produção de potência no espaço.[12]

Outra aplicação é o uso para máquinas frigoríficas e bombas de calor [13]. Em 1834, John Herschel, sugeriu o uso do motor Stirling para arrefecimento, mas foi apenas em 1864 que Alexander Kirk construiu a primeira máquina frigorífica.[14] Mais recentemente, a empresa Stirling Ultracold[15] tem desenvolvido com sucesso congeladores que usam a tecnologia Stirling pistão livre[16, 17, 18]

A tecnologia Stirling também tem sido usada em microcogeração doméstica operando, tipicamente, com gás natural.

Empresas como a *TheGreenAge*[19] desenvolveram sistemas de cogeração com recurso a diferentes tecnologias, entre as quais a tecnologia Stirling. O tema da cogeração será abordado de forma mais extensiva na **secção 2.4**.

2.2 Uso de Motor Stirling em Sistemas Parabólicos Solares

Existem alguns trabalhos com relação ao uso do motor Stirling em sistemas parabólicos solares. O primeiro registo do uso de motor Stirling em solar renovável remonta de 1872, por John Ericson.[20]

De acordo com Fraser, já citado, os motores Stirling mais comunmente usados em sistemas parabólicos são:

O motor SOLO 161 11 kW da Alemanha tem sido usado no projeto EnviroDish, com relatórios redigidos em 2002, 2003 e 2011.[21] O principal foco tem sido a redução dos custos de produção, montagem e transporte e também algumas otimizações no funcionamento. Alguns protótipos foram construídos em países como Espanha Itália e Arábia Saudita(**figura 2.9**). [22, 23];



Figura 2.9: Sistema disco/Stirling 50kW, Arabia Saudita [24]

O **Kockums (anteriormente United Stirling) 4-95 25 kW da Suécia** - de acordo com a Saab[25], o uso do motor Kockums para concentração solar foi abandonado e tem sido usado em sistemas AIP (Air-Independent Propulsion) para propulsão de submarinos suecos, de resto já citados;

O **STM 4-120 25 kW da empresa Stirling Thermal Motors, inc.** que foi posteriormente adquirido pela Stirling Power, nos Estados unidos da América [26, 27].

Nos últimos anos, têm surgido algumas empresas na Suécia focadas no projeto e construção de sistemas de aproveitamento de energias renováveis. Em 2009, formaram a INRESOLTM, com o objetivo de desenvolver "produtos de tecnologia Stirling, com recurso a energias renováveis tais como energia solar em desertos, biocombustíveis e reutilização de desperdícios. O grupo INRESOL tem produção na Suécia e na Índia" [28].

Com o intuito de tornar o consumidor final independente, bem como facilitar o seu uso e manutenção, a INRESOL desenvolveu, um motor Stirling do tipo gama, cujo fluido de trabalho é o Nitrogénio, denominado V2-6 (**figura 2.10**) e também uma série de sistemas complementares:



Figura 2.10: Motor Stirling V2-6 da INRESOLTM [29]

The GENIOUS Portable Multi Fuel CHP Stirling Generator - Um gerador Stirling portátil, de ímãs permanentes, que usa biofuel. Para uso doméstico ou em locais remotos (**figura 2.11**);

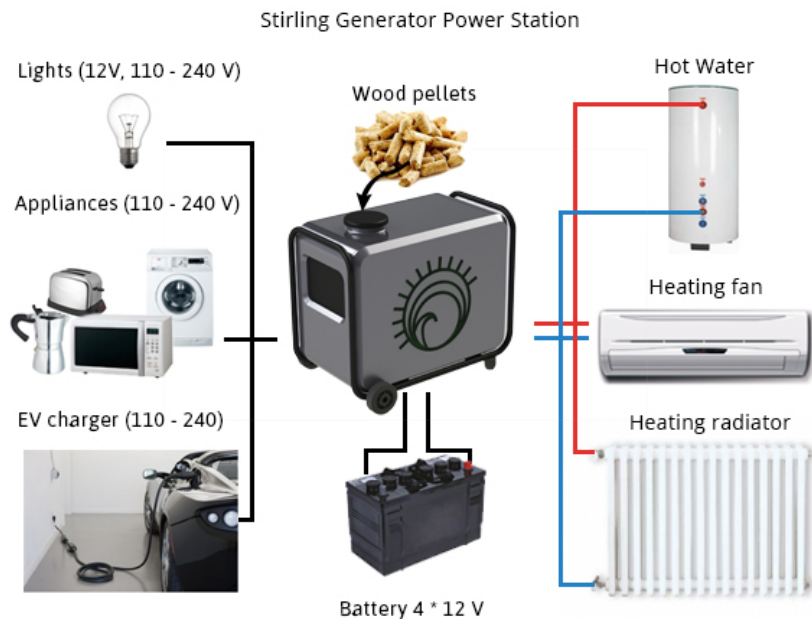


Figura 2.11: GENIOUS Portable Multi Fuel CHP Stirling Generator [30]

The GENIOUS Stirling Solar Tracker - Seguidor para cogeração solar. Utiliza o mesmo motor Stirling, mas o fluido de trabalho opera a uma pressão superior e o motor funciona com um valor mais elevado de rotações por minuto (RPM). A energia solar é captada por 36 painéis solares de 1m^2 que concentram a radiação na zona da fonte quente do motor. A fonte quente do motor admite 1000°C , o que resulta uma potência de saída de 10kW . O sistema pode atingir uma eficiência de 50%, dependendo da temperatura de operação (**figura 2.12**);

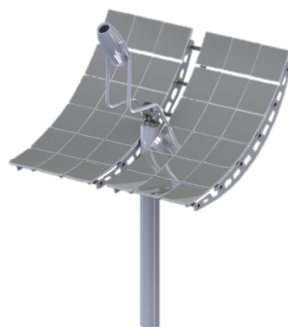


Figura 2.12: Seguidor solar GENIOUS [31]

The GENIOUS Container - Multi Fuel CHP Stirling Generator - Visto que existe a possibilidade de construir este contentor em qualquer dimensão, esta opção torna-se ideal para edifícios grandes como hospitais, escolas e centros comerciais. A INRESOL desenvolveu os seus motores Stirling com a capacidade de serem acoplados para formar blocos. Obtém-se assim uma capacidade, de acordo com o produtor, de até 200kW utilizando a mesma fonte de calor (**figura 2.13**);



Figura 2.13: Unidade contentora GENIOUS [32]

Sistema de monitorização em Cloud - Em parceria com a cloudindustries.eu[33], a empresa desenvolveu um servidor *cloud* onde os dados sobre a potência produzida pela unidade e outros dados da unidade são armazenados. Os dados são acessíveis por qualquer dispositivo com um *web browser* (**figura 2.14**). Esta opção torna possível a monitorização e controle de uma ou mas unidades de produção.[34]



Figura 2.14: Sistema de monitorização *Cloud* [33, 34]

2.3 Tecnologia Fotovoltaica

A tecnologia fotovoltaica é considerada uma das tecnologias renováveis emergentes mais promissoras. De acordo com o *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition*[35], nos 6 anos anteriores à data da sua publicação, houve uma redução para um quinto do custo dos módulos fotovoltaicos e o custo de sistemas completos reduziu para quase um terço. Em contrapartida novos sistemas foram instalados em 2013 a um ritmo de cerca de 100MW por dia. Estima-se que a capacidade global em 2014 tenha ultrapassado 150 GW. De acordo com a *BP Statistical Review of World Energy* de Junho de 2016[36], a energia solar teve a maior taxa de crescimento, cerca de 36%, de entre as diferentes fontes de energia renováveis.

2.3.1 Funcionamento

O efeito fotovoltaico ocorre quando a energia proveniente de fotões é absorvida e transformada em potência elétrica. Para que essa absorção ocorra, é necessário um material semicondutor. O semicondutor é constituído por uma junção P-N. Quando a radiação solar incide sobre o material, a energia proveniente dos fotões é transferida para os eletrões e estes libertam-se dos seus núcleos. Quando isso acontece, é induzido, na junção do semicondutor, um campo elétrico. Esse campo elétrico polariza as extremidades do condutor e passa a existir uma corrente elétrica no exterior do semicondutor.

O material mais usado é o dióxido de silício, mais conhecido por sílica[37, 38]. A junção da fotocélula é composta por uma parte dopada com fósforo, denominada de tipo n, e outra dopada com boro, denominada de tipo p.

2.3.2 Visão histórica

O primeiro registo do efeito fotovoltaico data de 1839, quando Alexandre-Edmond Becquerel observou que placas metálicas de platina ou prata mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz produziam uma diferença de potencial.[39, 40]

Apesar dos avanços tecnológicos nos anos seguintes, a tecnologia ainda tinha um custo muito elevado. Adicionalmente, a única procura de células fotovoltaicas era da parte de produtores de rádios e brinquedos para barcos em miniatura e rádios solares, entre outros[41].

Até ao final da década de 60 as necessidades energéticas crescentes foram sempre satisfeitas por células fotovoltaicas cada vez mais eficientes, tendo-se tornado a fonte de energia usada por satélites em todo o mundo. A crescente procura de células fotovoltaicas resultou num crescimento das empresas produtoras de células fotovoltaicas.

Enquanto que, para a exploração espacial, a preocupação prendia-se com o tamanho, a eficiência e a durabilidade dos painéis fotovoltaicos, para uso na Terra o critério principal é o custo por kilowatt hora. Até ao início dos anos 70, a tecnologia solar era muito cara. Dr. Elliot Berman, com o apoio da Exxon Corporation, desenhou uma célula fotovoltaica bastante mais barata, devido ao uso de sílica de menor qualidade e revestindo as células com material mais barato. O custo por watt passou de \$100 para \$20, tornando-a uma alternativa em locais longe de fontes de energia convencionais[41]. A indústria petrolífera foi uma das grandes investidoras iniciais, usando painéis fotovoltaicos para alimentar sinais luminosos e sonoros em alto mar no caso de plataformas petrolíferas. Também no caso de gasodutos e oleodutos, alguns bastante longe de fontes de energia convencionais, foi usada esta tecnologia. Outros usos de referência são as bóias sinalizadoras, e sinalizadores nas linhas ferroviárias.

Em 1971, Paul MacCready fundou a AeroVironement e desde então, em parceria com a NASA, tem desenvolvido protótipos de aeronaves movidos a energia solar fotovoltaica[42]. O seu primeiro sucesso foi a 7 de Julho de 1981, quando a aeronave Solar Challenger voou cerca de 262 km desde o aeroporto de Corneille-en-Verin, no norte de Paris, até à base da força aérea britânica de Manston, no sul de Londres, com uma duração de 5 horas e 23 minutos. Desde então, vários dos seus protótipos têm batido recordes tanto em altitude como em distância de voo[42].

Inicialmente os governos financiavam programas que favoreciam centrais solares de larga escala. No entanto muitos engenheiros aperceberam-se que a tecnologia tornava possível um edifício usar a sua própria fonte de energia com uma simples instalação no telhado. Esta abordagem reduz muito os custos de construção necessários no caso de uma central.

Os incentivos dos governos e a rápida redução dos custos de produção da tecnologia fotovoltaica nos últimos anos, tornam ao poucos esta tecnologia numa alternativa muito atrativa, razão pela qual, em certos casos, esta seja a primeira opção, nomeadamente em áreas remotas ou até locais onde seriam necessárias grandes obras.

Ainda assim, a tecnologia mantém-se cara, quando comparada com os combustíveis fósseis. O método de produção de sílica ainda é muito custoso[43]. Isso reflete-se no custo dos painéis, na instalação e adaptação às infraestruturas existentes.

O baixo rendimento dos painéis é outro grande entrave ao uso generalizado desta tecnologia. Os melhores painéis comercializados produzem, neste momento, com uma eficiência de 21% [44].

2.3.3 Alguns avanços recentes

Muitos investigadores têm feito estudos e recentemente têm sido relatados alguns com resultados bastante positivos.

Uma abordagem mais focada na otimização da disposição dos painéis resultou numa investigação no MIT. Com base em software lá desenvolvido e também alguns protótipos, conseguiram, com uma disposição em cubo ou em torre, como a demonstrada na figura 2.15 , um aumento de produção de eletricidade que vai entre duas a vinte vezes mais que aquela obtida em painéis fixos[45, 46]. Os resultados foram publicados na *Energy & Environmental Science* **figura 2.15** [47].

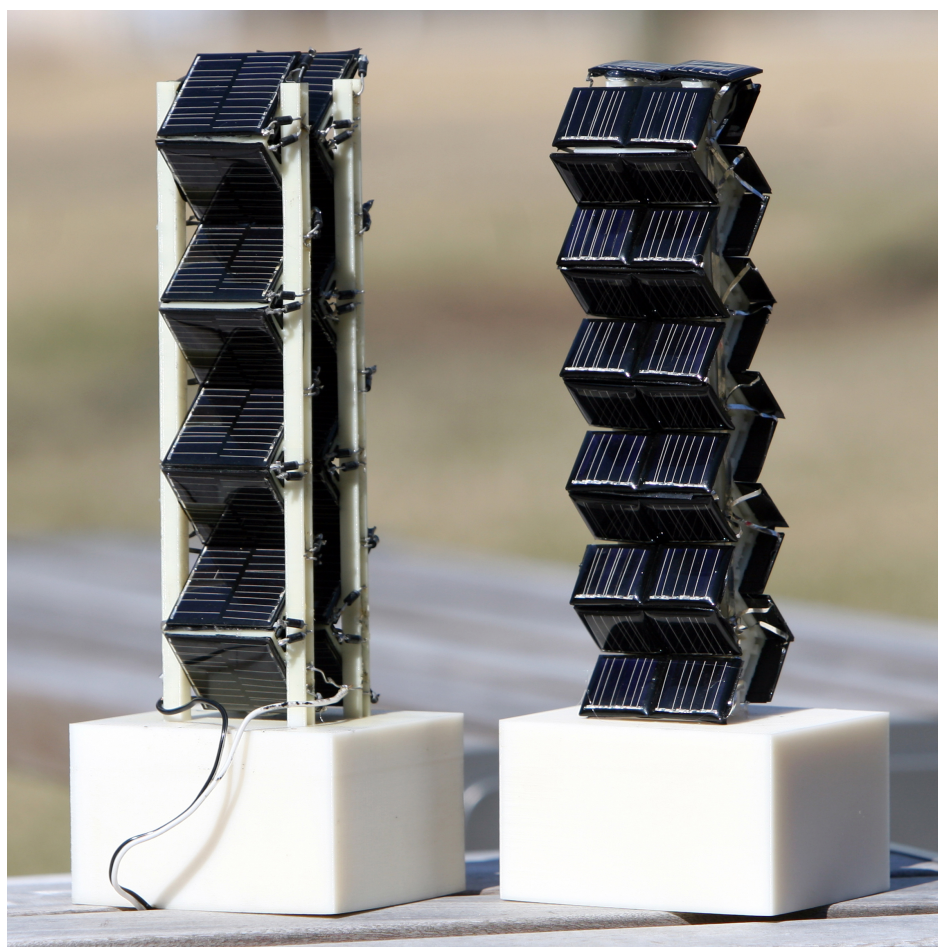


Figura 2.15: Duas versões em escala pequena dos painéis fotovoltaicos 3D usados por Jeffrey Grossman e sua equipa no telhado do MIT para medir a sua produção elétrica diária [47]

Na área dos nanomateriais, engenheiros da universidade de Stanford criaram um material que chamaram de nanocasca (*nanoshell*). Num artigo publicado na *Nature Communications*[48, 49], em fevereiro de 2012, é descrito o processo de produção de pequenas esferas ocas, feitas de silicone nanocristalino e como foi obtido com a luz um efeito que é fisicamente semelhante ao efeito obtido com o som no caso das "Galerias de sussurros" (Whispering galleries)[50, 51]. Os investigadores mostram-se muito otimistas e esperam melhorar a eficiência não só do efeito fotovoltaico, mas também do processo de produção dos painéis.

2.4 Cogeração

Cogeração é também conhecida por geração de Calor e Potência combinada, em inglês *Combined Heat and Power* (CHP).

Uma boa definição do conceito de cogeração é fornecida pela Galp[52]:

”A cogeração consiste no aproveitamento local do calor residual, originado nos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica que, de outra forma, seria desperdiçado.”

Outra descrição, fornecida por Moran e Shapiro, define um sistema de cogeração como ”um sistema integrado que produz, a partir de uma única fonte, dois produtos, eletricidade e calor, na forma de vapor ou água”[53].

O custo de produção é menor que o custo necessário para produzir eletricidade e calor em sistemas separados. Esta energia pode ser gerada à custa de desperdícios, e pode ser usada noutro processo na mesma instalação ou até no mesmo processo (um exemplo disso é a regeneração), vendida a terceiros ou vendida/cedida ao consumidor final.

A principal benesse da cogeração diz respeito ao aumento da eficiência do uso do combustível. Por exemplo, no caso de centrais de ciclo combinado com turbina a gás, o aproveitamento máximo é de 60%. Ao incluir a cogeração, o novo processo tem uma eficiência que pode chegar, de acordo com a GALP, aos 90% da energia contida no combustível.

A nível da indústria, para além das centrais de ciclo combinado com turbina a gás, a cogeração pode também ser usada em outras centrais de produção de energia como centrais a vapor ou centrais de motores de combustão, refinarias, fábricas de produção de papel, fábricas de transformação alimentar, etc. Em suma, em qualquer indústria onde haja necessidade de calor, a cogeração é aplicável.

Outra aplicação importante da cogeração é o uso para Água Quente Sanitária (AQS) nos municípios. Centrais de cogeração são construídas perto das cidades, fornecendo eletricidade e água quente proveniente do calor rejeitado do processo de produção de eletricidade. Um exemplo disso é o distrito de Manhattan, na cidade de Nova York. Na Europa, alguns países nórdicos como a Dinamarca e a Finlândia têm tido bastante sucesso com o uso da cogeração nos seus municípios[54, 55, 56, 57].

A cogeração também tem sido uma das opções na produção descentralizada de energia, sendo uma solução para uso doméstico, quer para consumo próprio, quer para venda exclusiva ou de excedentes.

2.4.1 Microcogeração

O uso de gás natural para aquecimento de água e climatização domésticos tornou-se uma opção comum nos últimos anos.

A integração da tecnologia Stirling nestes sistemas tornou-se também uma solução comum com a vantagem de poder ser adaptada a pequena escala, micro-cogeração. O motor substitui a caldeira e o aquecimento da água é feito à custa do arrefecimento na fonte fria do motor. Um gerador é acoplado ao sistema. A **figura 2.16** mostra um esquema do sistema. Uma aplicação similar é feita, trocando-se o gás natural por Pellets[58, 59]

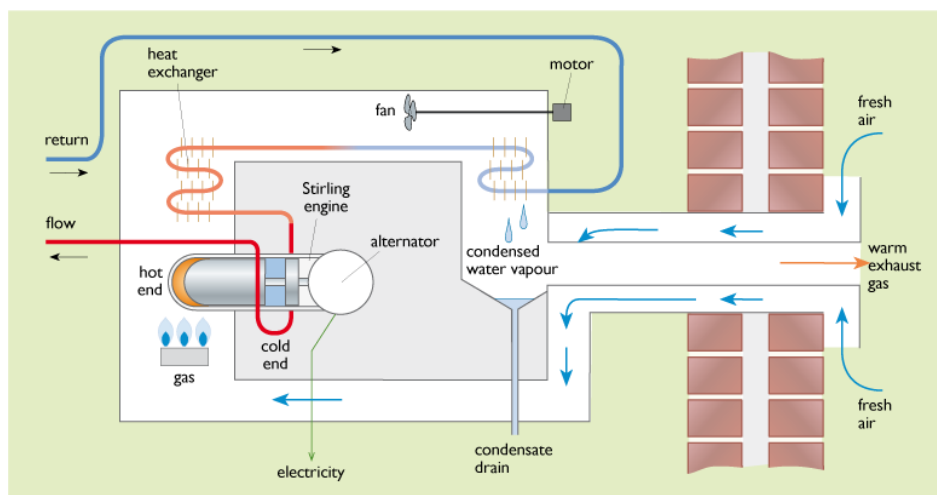


Figura 2.16: Esquema de um sistema de microcogeração [58, 59]

2.4.2 Cogeração em Portugal

De acordo com a legislação que será abordada na **secção 3.2**, a Comissão Europeia, ao abrigo do Artigo 14.º da Diretiva 2012/27/EU, relativa à Eficiência Energética, determinou que cada Estado Membro (EM) deveria realizar um estudo de identificação do potencial de cogeração de elevada eficiência e de sistemas de aquecimento e arrefecimento energeticamente eficientes, tendo em consideração as premissas estabelecidas no Anexo VIII da diretiva, para um horizonte temporal de 10 anos após o ano de referência utilizado (sendo no caso Português o ano 2014).[60, 61]

Em dezembro de 2016 foi elaborado, pelo Instituto de Sistemas e Robótica da Universidade de Coimbra, o "Estudo do Potencial de Cogeração de Elevada Eficiência em Portugal" [62]

O estudo aborda maioritariamente a cogeração em instalações industriais e refere brevemente o setor residencial.[62] Relativamente ao setor residencial, o relatório aponta que, comparativamente com outros países, "Portugal apresenta valores muito baixos, quando comparado com o consumo dos restantes países Europeus, com particular relevância no que diz respeito aos consumos para aquecimento e mesmo para arrefecimento ambiente."

Esses dados são apresentados nas **figuras 2.17 e 2.18**.

Uma das razões apresentadas é a redução do número de obras terminadas para cerca de 34,4% em 2013, comparativamente com o ano 2000.

Outra justificação apresentada baseia-se em dados da Direção Geral de Energia e Geologia (DGE), que relata uma "redução do consumo a uma taxa média de -4,4% ao ano desde 2009". Esta redução vem, não só do aumento da eficiência energética, mas também do aumento de taxas e preços de energia mais elevados.

O clima ameno em Portugal também é um fator que contribui para um consumo para climatização mais reduzido, comparativamente com outros países.

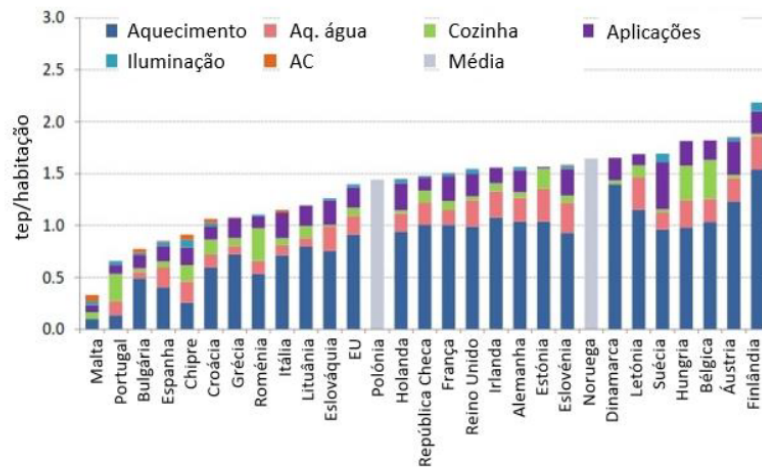


Figura 2.17: Consumo de energia por alojamento desagregado por uso final [62]

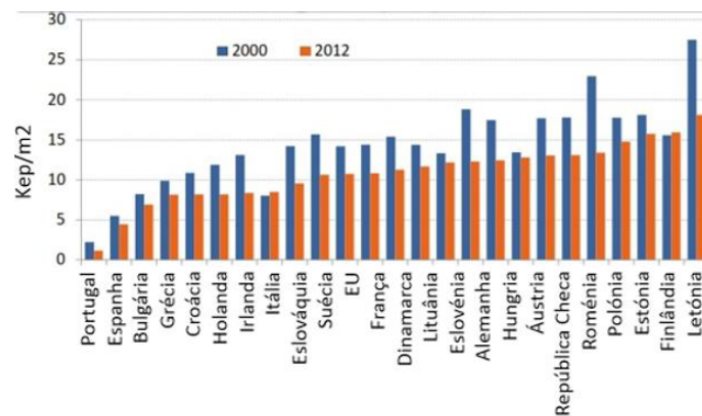


Figura 2.18: Consumo para aquecimento por m^2 [62]

Os estudos de caso apresentados consideram a cogeração com recurso a combustíveis fósseis. Isso resulta num retorno do investimento afetado pelo preço do combustível. Dos casos apresentados na secção 9.6.2 do Estudo do Potencial de Cogeração de Elevada Eficiência em Portugal [62], o caso 1, motor de combustão interna com potência de 5kW, o

caso 2, um motor de combustão interna com potência de $50kW$, e o caso 3, um motor de combustão interna com potência de $500kW$, todos analisados no âmbito do autoconsumo e no âmbito do regime especial de produção, com e sem prémios de elevada eficiência, são os mais relevantes para este trabalho.

No caso 1, na perspectiva privada, devido à pequena diferença entre o valor da eletricidade produzida e o custo do combustível, o investimento não é favorável. O caso 2, na perspectiva privada, apresenta um retorno simples de 5 anos e o caso 3, o retorno de investimento é de 6,7 anos, também na perspectiva privada.

Capítulo 3

Legislação

Para fazer um estudo comparativo da viabilidade entre a Tecnologia Stirling e a Fotovoltaica, é essencial considerar a legislação envolvida. As duas tecnologias enquadram-se em diferentes legislações, e o presente capítulo pretende explanar cada uma delas. Algumas considerações terão de ser feitas para uniformizar os desempenhos das duas tecnologias para obter uma análise comparativa mais correta. A legislação aborda muitas dessas considerações. A entidade reguladora da produção e venda de energia fotovoltaica é a Entidade Reguladora de Serviços Energéticos (ERSE)[63] e o órgão responsável pela "promoção e avaliação das políticas relativas à energia" é a DGEG[64]. O portal de acesso aos sistemas de registo da microprodução, miniprodução e autoconsumo, "Renováveis na Hora", é o site onde os produtores se registam.

3.1 Legislação para a produção descentralizada de energia elétrica

Durante a redação deste trabalho, a legislação vigente é o decreto-Lei n.º 153/2014 de 20 de outubro de 2014[66]. A descrição do site Renováveis na hora diz que este decreto-lei "cria os regimes jurídicos aplicáveis à produção de eletricidade destinada ao autoconsumo e ao da venda à rede elétrica de serviço público a partir de recursos renováveis, por intermédio de UPP" [65].

3.1.1 Objetivos principais do decreto

Os diferentes Decretos-lei, relativos à produção descentralizada de energia, elaborados ao longo dos anos, tiveram como objetivo responder, não só às diretivas europeias relativas a esta modalidade de produção, mas também ao mercado nacional e às capacidades dos produtores coletivos e individuais.

O decreto-lei n.º 68/2002 tinha como objetivo incentivar o produtor-consumidor (ou produtor em autoconsumo) a ter uma visão tripla da sua unidade de produção: autoconsumo, fornecimento de energia a terceiros e entrega de excedentes à rede. Eram então aplicáveis os regimes de remuneração Geral e Bonificado.

No entanto, a adesão era reduzida. De acordo com a introdução do decreto-lei em vigor à

data do trabalho, "a imaturidade da tecnologia desincentivava a realização de investimentos avultados que tivessem como única contrapartida o custo evitado com a aquisição da energia elétrica à rede". O Decreto-lei nº 34/2011 veio mudar a abordagem, apoiando-se antes "na atribuição de uma remuneração bonificada da totalidade da energia produzida, que permitisse aos promotores a recuperação dos montantes investidos".

Mais tarde, considerou-se necessário efetuar um novo ajuste da remuneração, tendo em consideração a redução do custo de investimento das tecnologias nos anos mais recentes. Outro objetivo era o da indução de "comportamentos de eficiência energética (...) contribuindo ainda para a otimização dos recursos endógenos e para a criação de benefícios técnicos para a Rede Elétrica de Serviço Público (RESP), nomeadamente através da redução de perdas na mesma".

Outros fatores apresentados, como a "implementação de uma política energética mais equilibrada e direcionada para a resolução dos problemas atuais das empresas, das famílias e do País", levaram o governo a elaborar o Decreto-Lei nº 153/2014, que vem reformular e integrar os decretos-lei que legislam a miniprodução (DL. nº 34/2011, alterado pelo DL. nº 25/2013) e os Decretos-Lei que legislam a microprodução (DL. nº 363/2007, alterado pelo nº 67-A/2007 e pelo nº 118-A/2010 e nº 25/2013).

Para além da micro e miniprodução beneficiarem de um único enquadramento legal, o Decreto-Lei inclui o regime jurídico aplicável ao autoconsumo. As atividades de produção descritas, pequena produção e autoconsumo, são designadas *atividades de produção distribuída*.

3.1.2 Definições gerais

O decreto-lei nº 153/2014 estabelece algumas definições comuns à pequena produção e ao autoconsumo.

O artigo 3º define:

(...)

- b) **Baixa Tensão (BT)**, a tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 1 kV;

(...)

- d) **Baixa Tensão Normal (BTN)**, a classificação tarifária de fornecimentos em BT com potência contratada inferior ou igual a 41,4 kVA;

- e) **Categoria BB, MB e MM**, o escalão de tensão de ligação à rede em que se insere uma dada Unidade de Produção (UP), considerando-se que integram a categoria BB as UP associadas a instalações de utilização alimentadas em BTN ou Baixa Tensão Especial (BTE); a categoria MB, as UP associadas a instalações de utilização alimentadas em Média Tensão (MT) com sistema de contagem instalado do lado da BT; e categoria MM, as UP associadas a pontos de consumo alimentados em Alta Tensão (AT) ou MT com sistema de contagem instalado do lado da AT ou MT;

- f) **Comercializador**, a entidade titular de um registo de comercialização de eletricidade em mercado ou qualquer outro operador legalmente autorizado a fornecer eletricidade;
- g) (**Comercializador de Último Recurso (CUR)**), a entidade referida no n.º 1 do artigo 73.º do Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de fevereiro, ou, na área das concessões de distribuição de eletricidade em BT, a entidade referida no n.º 4 do artigo 73.º do referido decreto-lei, quando os fornecimentos sejam exclusivamente em BT;
- h) **Energia consumida**, a energia elétrica utilizada na instalação elétrica de utilização, proveniente da UPAC ou da RESP;
- (...)
- j) **Entidade instaladora**, a entidade titular de alvará emitido pelo Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção, I. P. (IMPIC, I.P.) para a execução de instalações de produção de eletricidade ou o técnico responsável pela execução, a título individual, de instalações elétricas quando estas tenham uma potência até 50 kPot_a, nos termos da legislação que aprova os requisitos de acesso e exercício da atividade das entidades e profissionais responsáveis pelas instalações elétricas;
- k) **Instalação elétrica de utilização**, a instalação elétrica de consumo, associada ou não a um contrato de fornecimento de eletricidade celebrado com um comercializador;
- (...)
- m) **Operador da Rede de Distribuição (ORD)**, a entidade referida no artigo 35.º do Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de fevereiro;
- n) **Operador da rede**, a entidade titular de concessão ao abrigo da qual é autorizada a exercer a atividade de transporte ou de distribuição de eletricidade, correspondendo a uma das seguintes entidades, cujas funções estão previstas no Regulamento de Relações Comerciais: a entidade concessionária da Rede Nacional de Transporte de Energia Elétrica (RNT), a entidade titular da concessão da Rede Nacional de Distribuição (RND) e as entidades titulares da concessão de distribuição de eletricidade em BT;[67]
- o) **Ponto de ligação**, o ponto que estabelece a fronteira entre a instalação de produção e a instalação elétrica de utilização a que se encontra ligada;
- p) **Potência contratada**, o limite da potência estabelecida no dispositivo controlador da potência de consumo de eletricidade contratada com um comercializador, quando se trate de instalações ligadas em baixa tensão normal, ou a potência que o ORD coloca à disposição no ponto de entrega, quando se trate de instalações ligadas em baixa tensão especial, em MT e em AT;
- q) **Potência instalada**, a potência ativa e aparente, em kW e kPot_a, dos equipamentos de produção de eletricidade;
- r) **Potência de ligação**, a potência máxima ou, no caso de instalações com inversor, a potência nominal de saída deste equipamento, em kW e kPot_a, que o produtor pode injetar na RESP;

- s) **Produtor**, a entidade titular de um registo para a produção de eletricidade por intermédio de uma UP, nos termos do presente decreto -lei;
- t) **Promotor**, a entidade interessada em obter ou requerente de um registo para a produção de eletricidade por intermédio de uma UP, nos termos do presente decreto -lei;
- u) **O Sistema Eletrónico de Registo da UPAC e da UPP (SERUP)**, que constitui uma plataforma eletrónica de interação entre a Administração Pública, os promotores, os produtores e demais intervenientes no procedimento de registo e nas vicissitudes do registo, acessível através de portal eletrónico disponibilizado para o efeito;
- v) **Unidade de produção (UP)**, a UPAC e a UPP quando referidas conjuntamente.

3.1.3 Regime de Pequena Produção

O regime da pequena produção inclui a microprodução e miniprodução. O produtor vende a totalidade da energia elétrica à RESP, sendo a tarifa atribuída com base num modelo de licitação, no âmbito do qual os concorrentes oferecem descontos à tarifa de referência. O regime remuneratório geral previsto nos anteriores regimes jurídicos de miniprodução e de microprodução é eliminado.

Condições de acesso e Requisitos para acesso ao registo

Neste regime, a produção de energia elétrica provém *exclusivamente* de recursos renováveis. Designa-se Unidade de Pequena Produção (UPP) a instalação usada para o efeito, cuja potência máxima é inferior a 100% da potência contratada e não exceda os 250 kW.

Adicionalmente, é necessário que a energia consumida no local de instalação seja igual ou superior a 50% da energia produzida e consumida no ano anterior, no caso de instalações que já funcionam há um ano ou mais. Para instalações que tenham entrado em funcionamento há menos de um ano, é efetuada a relação entre a previsão anual de produção e de consumo de energia. Relativamente à potência instalada, o máximo permitido é 20MW.

Regime remuneratório

Em relação ao regime remuneratório, o n.º 1 artigo 30.º define três categorias das quais o produtor pode seleccionar:

- a) **Categoria I** - Na qual se insere o produtor que pretende proceder apenas à instalação de uma UPP, nos termos do presente decreto-lei;
- b) **Categoria II** - Na qual se insere o produtor que, para além da instalação de uma UPP, nos termos do presente decreto-lei, pretende instalar no local de consumo associado àquela, tomada elétrica para o carregamento de veículos elétricos, nos termos do Decreto-Lei n.º 39/2010, de 26 de abril, alterado pela Lei n.º 64-B/2011, de 30 de dezembro e pelos Decretos-Leis n.º 170/2012, de 1 de agosto, e 90/2014, de 11 de junho, ou seja proprietário ou locatário de um veículo elétrico;

- c) **Categoria III** - Na qual se insere o produtor que, para além da instalação de uma UPP nos termos do presente decreto-lei, pretende instalar no local de consumo associado àquela, coletores solares térmicos com um mínimo de 2 m² de área útil de coletor ou de caldeira a biomassa com produção anual de energia térmica equivalente.

3.1.4 Autoconsumo

A energia elétrica produzida em autoconsumo destina-se predominantemente a consumo na instalação associada à unidade de produção. Existe a possibilidade de ligação à RESP para venda, a preço de mercado, da eletricidade não autoconsumida ou venda direta ao CUR. A unidade de produção, aqui designada de UPAC, pode ou não ser baseada em tecnologias de produção renováveis.

Neste caso, e com o objetivo de promover um bom dimensionamento da unidade de produção, o produtor tem maior benefício quando o equipamento é dimensionado tendo em conta as necessidades de consumo da instalação. Esse benefício traduz-se no não pagamento, da parte do produtor, de uma compensação, que será abordada na secção "Remuneração".

Condições de acesso e Requisitos para acesso ao registo

No que diz respeito ao controlo prévio, o Artigo 4º define que, para o caso de uma UPAC cuja potência instalada seja superior a 1MW, é necessário obter uma licença de produção e uma licença de exploração.

Caso a potência de ligação seja superior a 200W e igual ou inferior a 1,5kW ou cuja instalação elétrica de utilização não se encontre ligada à RESP, a mesma está sujeita a mera comunicação prévia de exploração.

Para acesso ao registo, a potência de produção máxima admitida deve ser menor que 100% da potência contratada no contrato de fornecimento de energia. Adicionalmente, a potência instalada não deve ser superior a duas vezes a potência de ligação.

Remuneração

Relativamente à remuneração, o artigo 24º fornece a fórmula usada para o cálculo do valor da energia elétrica fornecida à RESP:

$$R_{UPAC,m} = E_{fornecida,m} \times OMIE_m \times 0,9 \quad (3.1)$$

Sendo:

- a) $R_{UPAC,m}$ - A remuneração da eletricidade fornecida à RESP no mês m , em €;
- b) $E_{fornecida,m}$ - A energia fornecida no mês m , em kWh;
- c) $OMIE_m$ - O valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês m , em €/kWh;
- d) m - O mês a que se refere a contagem da eletricidade fornecida à RESP.

O artigo 25º define o pagamento de uma compensação, por parte do produtor, no caso das UPAC com potência instalada superior a 1,5 kW e cuja instalação elétrica de utilização se encontre ligada à RESP. Esta compensação abrange os primeiros 10 anos após obtenção do certificado de exploração, e é calculada com base na seguinte expressão:

$$C_{UPAC,m} = P_{UPAC} \times V_{CIEG} \times K_t \quad (3.2)$$

Sendo:

- a) $C_{UPAC,m}$ - A compensação paga no mês m por cada kW de potência instalada, que permita recuperar uma parcela dos Custos decorrentes de medidas de política energética de sustentabilidade ou de Interesse Económico Geral (CIEG) na tarifa de uso global do sistema, relativa ao regime de produção de eletricidade em autoconsumo;
- b) P_{UPAC} - O valor da potência instalada da UPAC, constante no respetivo certificado de exploração;
- c) $V_{CIEG,t}$ - O valor que permite recuperar os CIEG da respetiva UPAC, medido em € por kW (€/Kw), apurado no ano t nos termos do número seguinte;
- d) K_t - O coeficiente de ponderação, entre 0% e 50%, a aplicar ao $V_{CieG,t}$ tendo em consideração a representatividade da potência total registada das UPAC no Sistema Elétrico Nacional, no ano t ;
- e) t - O ano de emissão do certificado de exploração da respetiva UPAC.

A expressão usada para calcular o $V_{CieG,t}$ é:

$$V_{CieG,t} = \sum_{n=0}^2 (CieG^p_{i(t-n)}) \times \frac{1}{3} + \sum_{n=0}^2 (CieG^e_{i,h(t-n)}) \times \frac{1}{3} \times \frac{1500}{12} \quad (3.3)$$

Em que:

- a) $CieG^p_i$ - Corresponde ao somatório do valor das parcelas i do CIEG, mencionadas no nº 1 do artigo 3º da Portaria nº 332/2012, de 22 de outubro, designadamente na alínea c), medido em €/kW, para o nível de tensão da respetiva UPAC, constante nos documentos de suporte da proposta de fixação de tarifas, publicados pela ERSE para o ano $t-n$;
- b) $CieG^e_{i,h}$ - Corresponde ao somatório, da média aritmética simples do valor para os diferentes períodos horários h de cada uma das parcelas i dos CIEG, mencionadas no nº 1 do artigo 3º da Portaria nº 332/2012, de 22 de outubro, designadamente nas alíneas a), b), d), e), f), g), h), i), e j), medido em € por kWh, para o nível de tensão da respetiva UPAC, constante nos documentos de suporte da proposta de fixação de tarifas, publicados pela ERSE para o ano $t-n$;
- c) i - Refere-se a cada uma das alíneas do nº 1 do artigo 3º da Portaria nº 332/2012, de 22 de outubro;
- d) h - Corresponde ao período horário de entrega de energia elétrica aos clientes finais, tal como definido na Portaria nº 332/2012, de 22 de outubro;

e) t - Corresponde ao ano de emissão do certificado de exploração da respetiva UPAC.

Para além da portaria n° 332/2012 mencionada, é necessário consulta do Decreto-Lei n° 240/2004, de 27 de dezembro, alterado pelos Decretos-Leis n°199/2007, de 18 de maio, e 264/2007, de 24 de julho

O coeficiente de ponderação K_t , referido na equação (3.2) assume os seguintes valores:

- a) $K_t = 50\%$, caso o total acumulado de potência instalada das UPAC, no âmbito do regime de autoconsumo, exceda 3% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do Sistema Elétrico Nacional (SEN);
- b) $K_t = 30\%$, caso o total acumulado de potência instalada de UPAC, no âmbito do regime de produção de eletricidade em autoconsumo, se situe entre os 1% e 3% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do SEN;
- c) $K_t = 0\%$, caso o total acumulado de potência instalada de UPAC, no âmbito do regime de autoconsumo, seja inferior a 1% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do SEN.

3.2 Cogeração

A diretiva n° 2012/27/UE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de outubro de 2012, relativa à eficiência energética, resultou na criação do Decreto-Lei n° 68-A/2015, de 30 de Abril[70]. Este Decreto-lei estabelece disposições em matéria de eficiência energética e cogeração.

Os três primeiros capítulos abordam a regulamentação do Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética para o período 2013-2016 (Estratégia para a Eficiência Energética - PNAEE 2016).

As alterações efetuadas ao regime jurídico da produção em cogeração são consideradas a partir do capítulo IV. Os artigos alterados são o 1°, 4°, 5°, 6°, 7°, 9°, 10°, 11°, 12°, 13°, 14°, 17°, 18°, 19°, 20°, 21°, 22°, 23°, 26°, 27°, 28°, 29°, 30°, 31° e 37°.

O Decreto-lei n°23/2010 é republicado na íntegra, com alterações incluídas.

3.2.1 Objetivos Principais

A "promoção da cogeração com base na procura de calor útil no mercado interno da energia" continua a ser o principal foco da diretiva europeia na qual este decreto-lei é baseado. Pretende-se também "promover a cogeração de elevada eficiência e as unidades de cogeração cuja potência térmica nominal total seja inferior a 20 MW, a fim de incentivar a produção de energia descentralizada."

Para o efeito, a segunda alteração ao Decreto-Lei n°23/2010, de 25 de março, alterado pela Lei n.o 19/2010, de 23 de agosto, estabelece "esquemas remuneratórios sustentáveis, que mantêm o incentivo à cogeração renovável e de elevada eficiência."

3.2.2 Definições Gerais

O artigo 2º do capítulo II, secção I do decreto-lei define:

(...)

- d) **Comercializador** - Um prestador de serviços a pedido que combina cargas de consumo de curta duração múltiplas para venda ou leilão em mercados de energia organizados, ou, tratando-se de comercializador dos setores elétrico ou do gás natural, as entidades referidas na alínea j) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 29/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos -Leis nº 104/2010, de 29 de setembro, nº 78/2011, de 20 de junho, nº 75/2012, de 26 de março, nº 112/2012, de 23 de maio, e 215-A/2012, de 8 de outubro, e na alínea k) do artigo 3º do Decreto-Lei nº 30/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis nº 66/2010, de 11 de junho, nº 77/2011, de 20 de junho, nº 74/2012, de 26 de março, nº 112/2012, de 23 de maio, e 230/2012, de 26 de outubro, respetivamente;
- e) **Consumidor final** - uma pessoa singular ou coletiva que compra energia para utilização própria;
- f) **Consumo de energia final** - toda a energia fornecida à indústria, transportes, agregados familiares, serviços e agricultura, com exceção dos fornecimentos ao setor da transformação de energia e às indústrias da energia propriamente ditas;
- g) **Consumo de energia primária** - o consumo interno bruto, excluindo as utilizações não energéticas;

(...)

- i) **Distribuidor de energia** - uma pessoa singular ou coletiva, incluindo um operador de rede de distribuição, responsável pela veiculação de energia tendo em vista o seu fornecimento aos consumidores finais ou a estações de distribuição que vendem energia aos consumidores finais;

(...)

- o) **Eficiência energética** - o rácio entre o resultado em termos do desempenho, serviços, bens ou energia gerados e a energia utilizada para o efeito;
- p) **Empresa de venda de energia a retalho** - uma pessoa singular ou coletiva que vende energia aos consumidores finais;
- q) **Energia** - todas as formas de produtos energéticos, combustíveis, calor, energia renovável, eletricidade ou qualquer outra forma de energia;

(...)

- s) **Melhoria da eficiência energética** - o aumento de eficiência energética resultante de mudanças tecnológicas, comportamentais e ou económicas;

(...)

- w) **Operador da rede de distribuição (ORD)** - um operador da rede de distribuição na aceção do Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 104/2010, de 29 de setembro, n.º 78/2011, de 20 de junho, n.º 75/2012, de 26 de março, n.º 112/2012, de 23 de maio, e n.º 215-A/2012, de 8 de outubro, e do Decreto-Lei n.º 30/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 66/2010, de 11 de junho, n.º 77/2011, de 20 de junho, n.º 74/2012, de 26 de março, n.º 112/2012, de 23 de maio, e n.º 230/2012, de 26 de outubro;
- x) **Operador da Rede de Transporte (ORT)** - um operador da rede de transporte na aceção do Decreto-Lei n.º 29/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 104/2010, de 29 de setembro, n.º 78/2011, de 20 de junho, n.º 75/2012, de 26 de março, n.º 112/2012, de 23 de maio, e n.º 215-A/2012, de 8 de outubro, e do Decreto-Lei n.º 30/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis n.º 66/2010, de 11 de junho, n.º 77/2011, de 20 de junho, n.º 74/2012, de 26 de março, n.º 112/2012, de 23 de maio, e n.º 230/2012, de 26 de outubro;
- z) **Prestador de serviços energéticos** - uma pessoa singular ou coletiva que fornece serviços energéticos ou aplica outras medidas para melhorar a eficiência energética nas instalações de um consumidor final;
- a) **Serviço energético** - a prestação do serviço que seja realizado com base num contrato e que, em condições normais, tenha dado provas de conduzir a uma melhoria verificável e mensurável ou estimável da eficiência energética e ou da economia de energia primária, originando benefícios tangíveis resultantes de uma combinação de energia com tecnologias e ou ações energeticamente eficientes, incluindo a operação, a manutenção e o controlo necessários à prestação do serviço;
- b) **Sistema de contagem inteligente** - um sistema eletrónico que mede o consumo de energia, e que está preparado para transmitir e receber dados através de comunicações eletrónicas;
- c) **Sistema de gestão da energia** - um conjunto de elementos, interrelacionados ou em interação, inseridos num plano que estabelece um objetivo de eficiência energética e uma estratégia para o alcançar.

Adicionalmente, o artigo 2.º-A (Definições) do decreto-lei n.º 23/2010, de 25 de março, republicado no presente decreto-lei, considera-se:

- a) **Calor útil** - A parte da energia térmica produzida num processo de cogeração a fim de satisfazer uma procura economicamente justificável de calor ou de frio, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética;
- b) **CIEG** - Os custos de interesse económico geral, ou seja, que decorrem de medidas de política energética, de sustentabilidade ou de interesse económico geral;
- c) **Cogeração** - A produção simultânea, num processo integrado, de energia térmica e de energia elétrica e, ou se for o caso, mecânica;
- d) **Cogeração eficiente** - A produção em cogeração não enquadrável na alínea seguinte, mas em que haja poupança de energia primária;

- e) ***Cogeração de elevada eficiência*** - A produção em cogeração que tenha uma poupança de energia primária de, pelo menos, 10% relativamente à produção separada de eletricidade e calor, bem como a cogeração de pequena dimensão e a microcogeração, de que resulte uma poupança de energia primária, sendo a poupança, em qualquer dos casos, calculada de acordo com a metodologia do anexo III;
- f) ***Cogeração de Pequena Dimensão (CPD)*** - A instalação de cogeração com uma potência instalada **inferior a 1 MW**;
- g) ***Cogeração renovável*** - A cogeração em que a energia primária consumida tem origem, parcial ou integralmente, em fontes de energia renováveis, tal como definidas no artigo 2º do Decreto-Lei nº 172/2006, de 23 de agosto;
- h) ***Cogerador*** - A entidade que detém o título do controlo prévio da produção em cogeração;
- i) ***Comercializador de último recurso (CUR)*** - A entidade referida no nº 1 do artigo 73º do Decreto-Lei nº 29/2006, de 15 de fevereiro, alterado pelos Decretos-Leis nº 104/2010, de 29 de setembro, nº 78/2011, de 20 de junho, nº 75/2012, de 26 de março, nº 112/2012, de 23 de maio, e 215-A/2012, de 8 de outubro;
- j) ***Eficiência global*** - O total anual da produção de energia elétrica e mecânica e da produção de calor útil dividido pelo consumo de combustível utilizado na produção de calor num processo de cogeração e na produção bruta de energia elétrica e mecânica, sendo a eficiência calculada com base no poder calorífico líquido dos combustíveis (também denominado poder calorífero inferior);
- k) ***Instalação ou unidade de cogeração*** - A instalação capaz de operar em modo de cogeração;
- l) ***Melhoria da eficiência energética*** - O aumento de eficiência energética resultante de mudanças tecnológicas, comportamentais ou económicas;
- m) ***Microcogeração*** - A cogeração de pequena dimensão cuja potência instalada máxima seja **inferior a 50 kW**;
- n) ***Poupança de energia*** - A quantidade de energia economizada, determinada pela medição e ou estimativa do consumo antes e após a aplicação de uma medida de melhoria da eficiência energética, garantindo simultaneamente a normalização das condições externas que afetam o consumo de energia;
- o) ***Poupança de energia primária*** - A poupança de energia calculada de acordo com a metodologia fixada no anexo III ao presente decreto-lei, do qual faz parte integrante;
- p) ***Procura economicamente justificável*** - A procura que não excede as necessidades de calor ou frio e que, se não fosse utilizada a cogeração, seria satisfeita nas condições do mercado mediante outros processos de produção de energia;
- q) ***Promotor*** - O requerente da atribuição de um ponto de ligação ou receção na rede, ou de um título de controlo prévio para a instalação ou autorização prevista no presente

decreto-lei;

(...)

- s) **Unidade de utilização associada** - A unidade industrial, de serviços ou outra, que seja abastecida pela energia produzida em autoconsumo na instalação de cogeração, desde que esta seja detida, direta ou indiretamente, pelo titular ou titulares daquela unidade.

3.3 Regime remuneratório da produção em cogeração

Existem duas modalidades de regime remuneratório possíveis:

A modalidade especial, aplicável a cogeradores cujas instalações possuam potência de injeção **igual ou inferior a 20MW** e cujo título de controlo prévio da cogeração "tenha sido obtido após prévia atribuição de potência de injeção de energia elétrica na RESP". Os termos e condições para a atribuição de de potência de injeção de energia elétrica em determinado ponto da RESP são aprovados, por portaria, por um membro do governo;

A modalidade geral, aplicável à produção em cogeração não enquadrada na modalidade especial.

3.3.1 Modalidade especial do regime remuneratório

Na modalidade especial, citando o n.º 1 do artigo 4.º-A, o cogrador é remunerado em uma das seguintes situações:

Fornecimentos de energia térmica a terceiros, em que o preço de venda é o que resultar dos contratos livremente celebrados entre o cogrador e o cliente ou clientes da energia térmica produzida na instalação de cogeração;

Fornecimentos de energia elétrica ao CUR, sendo que o preço de venda da energia ativa é igual a uma **tarifa de referência**, a que acresce, quando aplicável:

- i) **Um prémio de elevada eficiência**, calculado em função da poupança de energia primária realizada na cogeração **quando esta seja de elevada eficiência**;
- ii) **Um prémio de energia renovável**, em função da proporção de combustíveis de origem renovável consumidos na cogeração renovável, independentemente da eficiência da instalação.

A determinação da tarifa de referência, do ajustamento da tarifa de referência por modulação tarifária, do prémio de elevada eficiência e do prémio de energia renovável são definidos na portaria n.º 140/2012.[72]

É importante referir que, de acordo com o número 11 do artigo 4.º-A, "o valor dos prémios de elevada eficiência e de energia renovável, atribuídos cumulativa ou individualmente a uma instalação de cogeração, não pode exceder o montante de €7,5/MWh.

Tarifa de referência (T_{ref}) e Ajustamento da tarifa de referência por modulação tarifária

O Artigo 2.º da portaria nº 140/2012 define que os valores da tarifa de referência, T_{ref} , "são estabelecidos por despacho do diretor-geral da DGEG e publicados no respetivo sítio na internet, até ao final do 1.º mês de cada trimestre".

Visto que, à data da elaboração deste trabalho, o Despacho nº 3/2017 - Atualização trimestral da tarifa de referência da cogeração (1º trimestre de 2017) não se encontra disponível, a tarifa de referência será baseada no Despacho nº 29/2016 - Atualização trimestral da tarifa de referência da cogeração (4º trimestre de 2016)[73].

De acordo com o despacho, para instalações de cogeração renovável, o valor da T_{ref} é o seguinte:

i) $P \leq 2MW \Rightarrow \text{€}82,98/\text{MWh}$;

ii) $2MW < P \leq 100MW \Rightarrow \text{€}67,33/ME$.

Onde P é a potência elétrica instalada da cogeração. T_{ref_m} é a tarifa de referência no mês m .

O Artigo 4.º da portaria nº 140/2012 define o ajustamento da tarifa de referência por modulação tarifária. A tarifa de referência aplicável durante as horas cheias e de ponta do tarifário geral em ciclo semanal, $T_{ref_{mpc}}$, será:

$$T_{ref_{mpc}} = 1,10 \times T_{ref_m} \quad (3.4)$$

A tarifa de referência aplicável durante as horas de vazio e super vazio do tarifário geral em ciclo semanal, $T_{ref_{mvs}}$, será:

$$T_{ref_{mvs}} = 0,87 \times T_{ref_m} \quad (3.5)$$

Prémio de elevada eficiência

O artigo 5.º da portaria nº 140/2012 define o cálculo do Prémio de elevada eficiência, expresso em euros(€):

$$PE_m = PC \times \frac{PEP}{1 - PEP} \times EEPL_m \times K \times \frac{EP}{EE} \quad (3.6)$$

Onde:

- a) PE_m é o valor do prémio de eficiência no mês m ;
- b) PC é o custo de referência para valorização da poupança de energia primária e assume o valor de €28,71/MWh;
- c) PEP é a poupança certificada na garantia ou certificado de origem emitida pela Entidade Emissora das Garantias de Origem (Entidade Emissora de Garantias de Origem (EEGO)), nos termos dos artigos 21.º e 22.º do Decreto-Lei nº 23/2010, de 25 de março, em vigor na instalação de cogeração e expressa em percentagem;

- d) **EEPL_m** é a energia elétrica produzida pela instalação de cogeração no mês *m*, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética, expressa em MWh;
- e) **K** é o fator adimensional que distingue o **PE_m** de acordo com o grau de poupança de energia primária pela instalação de cogeração, e que toma os seguintes valores:
 - i) **K = 0,5** no caso de cogerações de elevada eficiência;
 - ii) **K = 0,3** no caso de cogerações eficientes;
- f) $\frac{EP}{EE}$ é a relação entre a energia primária consumida na instalação de cogeração no ano civil anterior ao mês *m* e a energia elétrica produzida na instalação de cogeração no mesmo período, certificada pela EEGO, utilizando-se, enquanto não houver aquela certificação, os coeficientes seguintes:
 - (...)
 - vii) Instalações de cogeração renovável: **5**.

Prémio de energia renovável

O artigo 6.º da portaria n.º 140/2012 define o cálculo do prémio de energia renovável, em euros(€):

$$PR_m = Tref_m \times R \times \frac{CR}{C} \times EEPL_m \quad (3.7)$$

onde:

- a) **PR_m** é o valor do prémio de energia renovável no mês *m*;
- b) **Tref_m** é a tarifa de referência aplicável no mês *m*;
- c) **R** é igual a **10%**;
- d) $\frac{CR}{C}$ é a fração de combustíveis renováveis consumidos na instalação de cogeração no ano civil anterior ao mês *m*, tal como certificada pela EEGO;
- e) **EEPL_m** é a energia elétrica produzida pela instalação de cogeração no mês *m*, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética, expressa em MWh.

3.3.2 Modalidade geral do regime remuneratório

O artigo 4.º-B do Decreto-Lei n.º 68-A define a modalidade geral, dividindo-a em duas submodalidades:

Submodalidade A

A submodalidade A "integra as cogerações com potência de injeção à rede igual ou inferior a 20MW que operam em modo de **autoconsumo** da eletricidade produzida, sendo a energia não consumida entregue ao CUR, nos termos do n.º 3 do artigo 4.º-B".

Os números seguintes do do artigo, definem que "a cogeração opera em **autoconsumo** quando a **energia elétrica** produzida, para além da utilizada nos serviços auxiliares, se destine ao abastecimento de uma unidade de utilização associada, e a **energia térmica** se destine ao próprio cogrador ou seja fornecida a terceiros".

A energia elétrica produzida nestes parâmetros de potência que não seja consumida na unidade de utilização associada, por opção do cogrador, pode ser vendida ao CUR, nos termos a estabelecer em portaria do membro do Governo responsável pela área da energia. A portaria em questão, Portaria n.º173/2016, 21 de junho[74] estabelece ainda que a energia térmica produzida no processo de cogeração pode ser consumida pelo próprio fornecedor ou fornecida a terceiros. Distingue ainda, dentro da Submodalidade A, as seguintes submodalidades que o produtor seleciona, aquando da inscrição no portal:

- i) **A submodalidade A1** - autoconsumo da eletricidade, **com injeção do excedente na rede** e contrato com o CUR para venda deste excedente;
- ii) **A submodalidade A2** - autoconsumo de eletricidade, **sem injeção do excedente na rede**.

O artigo 20º fornece a fórmula usada no cálculo da remuneração da energia elétrica injetada na RESP na submodalidade A:

$$Rem_m = E_{fornecida_m} \times OMIE_m \times \alpha \quad (3.8)$$

Em que:

Rem_m é a remuneração da eletricidade injetada à RESP no mês **m**, em euros (€);

E_{fornecida_m} é a energia fornecida no mês **m**, em kWh;

OMIE_m é o valor resultante da média aritmética simples dos preços de fecho do Operador do Mercado Ibérico de Energia (OMIE) para Portugal (mercado diário), relativos ao mês **m**, em €/kWh;

m é o mês a que se refere a contagem da eletricidade fornecida à RESP;

α é igual a **1** para a energia fornecida durante o período horário de cheia e ponta em ciclo semanal, ou igual a **0,85** para a energia fornecida nos períodos de vazio e supervazio em ciclo semanal, de acordo com os períodos tarifários definidos pela ERSE.

O Artigo 29.º estabelece o programa previsional que consiste na informação prévia por parte do cogrador ao operador da RESP a que se encontra ligado e ou à concessionária da RNT, bem como ao CUR, com uma antecedência mínima de 36 horas em relação a um determinado dia e de acordo com formulário a disponibilizar por este.

Submodalidade B

Integra as cogerações que operam em *regime de venda, total ou parcial, de eletricidade* produzida em mercados organizados ou mediante contratos bilaterais.

O n.º 4 do artigo 4.º-B do decreto-lei n.º 68-A refere que "O produtor que não pretenda celebrar contrato de venda da eletricidade com o CUR, nos termos do presente artigo, preferindo estabelecer outro tipo de relacionamento comercial, designadamente, a venda em mercados organizados ou mediante contrato bilateral da eletricidade não consumida na instalação de utilização associada à instalação de cogeração, deve enquadrar-se na submodalidade B da modalidade geral do regime remuneratório".

- i) **A submodalidade B1** - Venda da eletricidade em mercados organizados ou bilaterais;
- ii) **A submodalidade B2** - Autoconsumo e venda do excedente em mercado organizado ou mediante contratação bilateral.

Na submodalidade B da modalidade geral, a remuneração da energia fornecida pelos cogeredores é efetuada através de:

- a) **Fornecimentos de energia térmica a terceiros**, em que o preço de venda é o que resultar dos contratos celebrados entre o cogedor e o cliente ou clientes da energia térmica produzida na instalação de cogeração;
- b) **Fornecimentos de energia elétrica a cliente ou clientes diretamente ligados à instalação de cogeração**, em que o preço de venda é o que for livremente estabelecido entre as partes, não incidindo sobre estes fornecimentos tarifas de acesso às redes, com exceção da tarifa de uso global do sistema, nos termos a prever em regulamentação da ERSE;
- c) **Fornecimentos de energia elétrica através da celebração de contratos bilaterais com clientes ou comercializadores**, em que o preço de venda é o que for livremente estabelecido entre as partes;
- d) **Fornecimentos em mercados organizados**, em que o preço é o que resultar das vendas realizadas nesses mercados.

Pagamento de compensação pelas instalações de cogeração em autoconsumo

De acordo com o n.º 5 do artigo 4.º-B, as instalações de cogeração destinadas a autoconsumo ou cujas instalações de utilização associadas consumam a energia produzida por aquelas, ao abrigo de qualquer submodalidade, **e que se encontrem ligadas à RESP**, estão sujeitas ao pagamento de uma compensação mensal fixa, nos primeiros 10 anos após a obtenção do título que habilita a entrada em exploração, calculada nos termos do artigo seguinte (Artigo 4.º-C).

A expressão fornecida para o cálculo da compensação, de acordo com a declaração de retificação n.º 30-A/2015[71], é a seguinte:

$$C_{COG_{\alpha,t}} = P_{COG} \times V_{CIEG_{\alpha,t}} \times K_t \quad (3.9)$$

Sendo:

- a) $C_{COG_{\alpha,t}}$ - A compensação paga, em euros, no mês m por cada kW de potência instalada, num dado nível de tensão ou tipo de fornecimento, que permita recuperar uma parcela dos CIEG na tarifa de uso global do sistema, relativa ao regime de produção em autoconsumo através de uma instalação de cogeração;
- b) P_{COG} - O valor da potência elétrica instalada da instalação de cogeração, constante no respetivo certificado ou licença de exploração;
- c) $V_{CIEG_{\alpha,t}}$ - O valor que permite recuperar os CIEG da respetiva instalação de cogeração, medido em € por kW, para um dado nível de tensão ou tipo de fornecimento, apurado no ano t nos termos do número seguinte;
- d) K_t - O coeficiente de ponderação, entre 0% e 50%, a aplicar ao $V_{CIEG_{\alpha,t}}$ tendo em consideração a representatividade da potência total registada das instalações de cogeração com potência elétrica instalada igual ou inferior a 20 MW no Sistema Elétrico Nacional, no ano t ;
- e) t - O ano de emissão do título de exploração da respetiva instalação de cogeração;
- f) α - Nível de tensão ou tipo de fornecimento, podendo ser Muito Alta Tensão (MAT), a AT, a MT, a BTE, a BTN com potência contratada igual ou superior a 20,7 kPot_a e a BTN com potência contratada inferior a 20,7 kPot_a.

O $V_{CIEG_{\alpha,t}}$ referido na alínea c) é calculado com a seguinte expressão:

$$V_{CIEG_{\alpha,t}} = \sum_{n=0}^2 (CIEG_{i(t-n)}^p) \times \frac{1}{3} + \sum_{n=0}^2 (CIEG_{i,h(t-n)}^e) \times \frac{1}{3} \times \frac{4.500}{12} \quad (3.10)$$

Em que:

- a) $CIEG_i^p$ - Corresponde ao somatório do valor das parcelas i do CIEG, mencionadas no n.º 1 do artigo 3.º da Portaria n.º 332/2012, de 22 de outubro, designadamente na alínea c), medido em € por kW, para o nível de tensão da respetiva instalação de cogeração, constante nos documentos tarifários, publicados pela ERSE para o ano $t-n$;
- b) $CIEG_{i,h}^e$ - Corresponde ao somatório, da média aritmética simples do valor para os diferentes períodos horários h de cada uma das parcelas i dos CIEG, mencionadas no n.º 1 do artigo 3.º da Portaria n.º 332/2012, de 22 de outubro, designadamente nas alíneas a), b), d), e), f), g), h), i), e j), medido em €/kWh, para o nível de tensão da respetiva instalação de cogeração, constante nos documentos tarifários, publicados pela ERSE para o ano $t-n$;
- c) i - Refere-se a cada uma das alíneas do n.º 1 do artigo 3.º da Portaria n.º 332/2012, de 22 de outubro;
- d) h - Corresponde ao período horário de entrega de energia elétrica aos clientes finais, tal como definido na Portaria n.º 332/2012, de 22 de outubro;

- e) t - Corresponde ao ano de emissão do certificado de exploração da respetiva instalação de cogeração.

O coeficiente de ponderação K_t referido na alínea d) do n.º 1 assume os seguintes valores:

1. $K_t = 50\%$, caso a soma da potência instalada das instalações de cogeração da submodalidade A com a potência instalada das cogerações na submodalidade B que, no todo ou em parte, consumam ou entreguem a instalações de utilização associadas a energia produzida por aquelas exceda 7,5% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do SEN;
2. $K_t = 30\%$, caso a soma da potência instalada das instalações de cogeração da submodalidade A com a potência instalada das cogerações na submodalidade B que, no todo ou em parte, consumam ou entreguem a instalações de utilização associadas a energia produzida por aquelas se situe entre os 5% e 7,5% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do SEN;
3. $K_t = 0\%$, caso a soma da potência instalada das instalações de cogeração da submodalidade A com a potência instalada das cogerações na submodalidade B que, no todo ou em parte, consumam ou entreguem a instalações de utilização associadas a energia produzida por aquelas seja inferior a 5% do total da potência instalada de centro eletroprodutores do SEN.

3.4 Cálculo da eletricidade produzida em cogeração

O anexo II do decreto-lei n.º 68-A/2015 retificado na declaração de retificação 30-A/2015[71], define que a "eletricidade produzida em cogeração será considerada **igual** à produção de eletricidade anual total da unidade medida à saída dos geradores principais" para certas tecnologias abrangidas pelo decreto-lei, enumeradas no Anexo I. Unidades de cogeração com recurso à tecnologia Stirling com uma eficiência anual global de pelo menos 75%, estão abrangidos nessa lista .

Caso a unidade de cogeração tenha uma eficiência anual global inferior a esse valor, a quantidade de eletricidade produzida em cogeração é calculada de acordo com a expressão que consta da Declaração de Retificação n.º 30-A/2015:

$$E_{CHP} = H_{CHP} \times C \quad (3.11)$$

Em que:

E_{CHP} - é a quantidade de eletricidade produzida em cogeração;

C - é o rácio eletricidade/calor (entendido como o rácio entre a eletricidade produzida em cogeração e o calor útil produzido exclusivamente em modo de cogeração, utilizando dados operacionais da unidade em causa);

H_{CHP} - é a quantidade de calor útil produzida em cogeração (calculada para o efeito como produção total de calor, deduzindo o calor que seja eventualmente produzido em caldeiras separadas ou por extração de vapor vivo do gerador de vapor antes da turbina).

3.5 Cálculo da poupança de energia primária

A expressão do cálculo da poupança de energia primária, que consta no anexo III do decreto-lei n.º 68-A/2015 é dado pela expressão:

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{CHP_{H\eta}}{Ref_{H\eta}} + \frac{CHP_{E\eta}}{Ref_{E\eta}}} \right] \times 100\% \quad (3.12)$$

Em que:

CHP $H\eta$ é a eficiência térmica do processo, definida como a produção anual de calor útil dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor e de eletricidade;

Ref $H\eta$ é o valor de referência da eficiência para a produção separada de calor;

CHP $E\eta$ é a eficiência elétrica, definida como a produção total anual de eletricidade dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor útil e de eletricidade num processo de cogeração. Quando uma unidade de cogeração gerar energia mecânica, a quantidade anual de energia elétrica proveniente da cogeração poderá ser acrescida de um elemento suplementar que represente a quantidade de energia elétrica que é equivalente à da energia mecânica. Este elemento não criará um direito de solicitar garantias de origem nos termos do artigo 21.º (do Decreto-lei n.º 68-A 2015);

Ref $E\eta$ é o valor de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade.

Os valores de referência harmonizados em matéria de eficiência para a produção separada de eletricidade e de calor, **Ref $H\eta$** e **Ref $E\eta$** , para efeitos de determinação da eficiência da cogeração, nos termos do anexo III referido, constam de decisão adotada pela Comissão Europeia, referidos na Diretiva 2012/27/UE do parlamento e do conselho. Estes valores correspondem à eficiência da produção separada de calor e de eletricidade que a cogeração se destina a substituir. [60]

De acordo com a diretiva, os valores "consistem numa matriz de valores diferenciados por fatores pertinentes, incluindo o ano de construção e os tipos de combustíveis, e devem ter por base uma análise bem documentada que tenha, designadamente, em conta os dados operacionais de utilização em condições realistas, a combinação de combustíveis e as condições climáticas, bem como as tecnologias de cogeração aplicadas."

Os valores de referência em matéria de eficiência devem ser calculados de acordo com os seguintes princípios:

1. Para as unidades de cogeração, a comparação com a produção separada de eletricidade baseia-se no princípio da comparação das mesmas categorias de combustível.
2. Cada unidade de cogeração será avaliada por comparação com a melhor tecnologia disponível e economicamente justificável para a produção separada de calor e eletricidade existente no mercado no ano de construção da unidade de cogeração.

3. Os valores de referência em matéria de eficiência para as unidades de cogeração com mais de 10 anos serão iguais aos aplicáveis às unidades com 10 anos.
4. Os valores de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade e calor devem refletir as diferenças climáticas entre Estados-Membros.

3.6 Avaliação custo-benefício

O Anexo V do decreto-lei n.º 68-A/2015 estabelece os parâmetros para a análise custo-benefício.

A análise é aplicável nas seguintes situações:

1. **Análise de custo-benefício para efeitos do estudo do potencial de cogeração de elevada eficiência em Portugal**, como consta do n.º 3 do artigo 26.º do mesmo decreto-lei;
2. **Análise custo-benefício para títulos de controlo prévio e licenças de produção em cogeração** como consta da alínea d) do n.º 1 do artigo 10.º e na alínea d) do n.º 2 do artigo 14.º do mesmo decreto-lei.

3.6.1 Análise custo-benefício para Estudo do potencial de cogeração de elevada eficiência em Portugal

Esta análise, tem por objetivo "determinar em que base será estabelecida uma escala de atribuição de prioridades aos limitados recursos existentes a nível da sociedade."

Este estudo de identificação do potencial de cogeração de elevada eficiência e de sistemas de aquecimento e arrefecimento energeticamente eficientes, já abordado no capítulo da cogeração, foi determinado pela comissão europeia, ao abrigo do artigo 14.º da Diretiva 2012/27/EU, relativo à eficiência energética. [60, 61, 62]

3.6.2 Análise custo-benefício para títulos de controlo prévio e licenças de produção em cogeração

As análises de custo-benefício devem fornecer informações para efeitos da consideração de uma nova cogeração ou da renovação substancial de uma cogeração como de elevada eficiência.

Deve basear-se numa descrição da instalação projetada e da instalação ou instalações objeto de comparação, abrangendo, se for caso disso, a capacidade elétrica e térmica, o tipo de combustível utilizado, a utilização prevista e o número de horas de funcionamento anual planeado, e a localização e as necessidades de energia elétrica e térmica.

Para proceder à comparação, devem ser tidas em conta as necessidades de energia térmica e os tipos de aquecimento e arrefecimento utilizados pelos pontos de procura de calor mais próximos. A comparação deve abranger os custos de infraestrutura da instalação projetada e da instalação ou instalações objeto de comparação.

As análises de custo-benefício realizadas para efeitos deste n.º 2, devem incluir uma análise económica na qual sejam refletidos os fluxos reais de tesouraria ligados ao investimento em determinadas instalações e ao seu funcionamento.

Os projetos com um resultado de custo-benefício positivo são aqueles em que a soma dos benefícios atualizados na análise económica excede a soma dos custos atualizados (excedente de custo-benefício).

3.7 Regimes considerados na simulação

Nos casos apresentados no **capítulo 5**, a modelação do motor Stirling será feita com aplicação da legislação referente à cogeração. No caso do sistema fotovoltaico e painéis solares térmicos, serão analisados a pequena produção e o autoconsumo.

No caso da pequena produção, será considerado no estudo de caso, a **categoria III**, que mais se aproxima à cogeração.

Relativamente à cogeração, como a tecnologia se baseia em fontes renováveis, é considerado o **regime remuneratório especial**, com fornecimentos de energia elétrica ao CUR e com prémio de elevada eficiência e prémio de energia renovável. Também é considerada a **submodalidade A1** da modalidade geral do regime remuneratório da cogeração.

Capítulo 4

Software de Simulação

Para avaliação dos estudos de caso, será usado o System Advisor Model (SAM). Trata-se de um software de modelação e análise do desempenho energético e financeiro de sistemas energéticos com recurso a energias renováveis.

O SAM foi desenvolvido pela National Renewable Energy Laboratory(NREL), dos Estados Unidos da América [75]. O site fornece a lista de artigos e dissertações que descrevem os algoritmos usados pelos diferentes modelos de desempenho [76]. A versão de software usada no âmbito desta tese é a versão 2017.1.17, 64 bit, revisão 3 para Windows.

4.1 Estudos de caso e validação dos modelos da ferramenta de simulação

O site da NREL apresenta alguns estudos de caso que comparam as simulações do SAM com dados disponíveis sobre sistemas fotovoltaicos[77].

Estes estudos de caso servem para Validação da ferramenta, e caracterizam o comportamento da mesma, quando comparada com modelos reais.

É importante referir que os estudos de caso disponíveis correspondem a versões anteriores à versão 2017.1.17, usada no âmbito deste trabalho.

Ainda assim, as alterações e atualizações efetuadas no software, de versão para versão resultaram, na sua maioria, de melhorias de algoritmos e adição de opções de módulos. O uso dos estudos de caso de versões anteriores resultará numa maximização aceitável do erro.

4.1.1 Modelo do Sistema fotovoltaico

De acordo com o manual de instruções[78], o SAM possui dois modelos de desempenho (*performance models*) para painéis fotovoltaicos simples:

- i) ***Detailed Photovoltaic*** - Calcula a potência elétrica produzida por um sistema fotovoltaico usando modelação separada do módulo fotovoltaico e do inversor. É necessário fornecer especificações do módulo e inversor assim como informação sobre o número de módulos e inversores no sistema. O utilizador pode inserir as especificações, obtidas do

fornecedor, ou escolher da base de dados do *software*. A modelação considera o efeito da temperatura no desempenho do módulo assim como, opcionalmente, sombreamento e outras perdas.

Este modelo é ideal, quando o utilizador tem informação do equipamento que vai ser usado no sistema;

- i) **PVWatts Model** - É a implementação de um calculador fotovoltaico online da NREL [79]. Trata-se de um modelo mais simples, no que diz respeito ao número de opções que o utilizador tem ao seu dispor. É possível definir a capacidade do módulo, orientação e perdas. Mas é o *software* que define as características do módulo fotovoltaico e do inversor. A versão do PVWatts implementada no SAM inclui opções de modelação de sombreamento que não estão presentes na versão online.

Este modelo é usado para uma análise inicial do projeto, na qual o utilizador não tem ainda informações sobre o tipo de equipamento que será utilizado no sistema, ou também quando é necessário obter uma estimativa inicial da potência elétrica produzida pelo sistema.

Um dos estudos de validação da ferramenta de modelação fotovoltaica, foi elaborado por Freeman et al [80].

Pretendia-se com o trabalho a validação das várias ferramentas de modelação, por forma a dar uma visão mais fiável das mesmas à indústria, e ao mesmo tempo, obter uma melhor caracterização das capacidades e limitações de cada ferramenta de modelação. Com um grau de fiabilidade definido, projetos que usem essas ferramentas asseguram financiamento mais competitivo e obtém-se uma melhor caracterização da performance esperada.

O NREL teve acesso a dados detalhados do desempenho de nove sistemas fotovoltaicos. O estudo efetua uma comparação desses dados com os obtidos por diferentes ferramentas de modelação, entre os quais o SAM (Versão 2014.1.14).

Relativamente à escolha do modelo de *performance* dos módulos fotovoltaicos, o estudo de validação analisa o **modelo de performance CEC** com base de dados de módulos, desenvolvido na Universidade do Wisconsin, e o **modelo de performance do Sandia**, desenvolvido pela *Sandia National Laboratories*. Por defeito, o SAM tem selecionado o **modelo de performance CEC**. O SAM tem também diferentes opções relativamente à escolha dos componentes de irradiação solar. As opções analisadas na validação são a **feixe total** (*total beam*) e a **feixe e difusão** (*beam and diffuse*). De acordo com o manual do SAM, já referido, estas opções definem as combinações de irradiação difusa horizontal, normal direta e horizontal global que o software usa. Por defeito, está definida a opção de feixe e difusão.

A **figura 4.1** apresenta o erro anual entre os valores de produção elétrica obtidos nas modelações feitas no SAM, e os valores medidos em cada um dos sistemas fotovoltaicos. Para cada um dos sistemas, são apresentados quatro casos, para cada uma das conjugações dos dois modelos de módulos e os dois de tipo de irradiação, já referidos. No caso do SAM, a figura mostra que a escolha do módulo e do tipo de irradiação influenciam o erro anual. As escolhas resultam em erros cujos valores variam entre 0.9% e 6.6%. Para os nove sistemas em estudo, as combinações examinadas resultam numa amplitude máxima de $\pm 8.5\%$ para o erro anual.

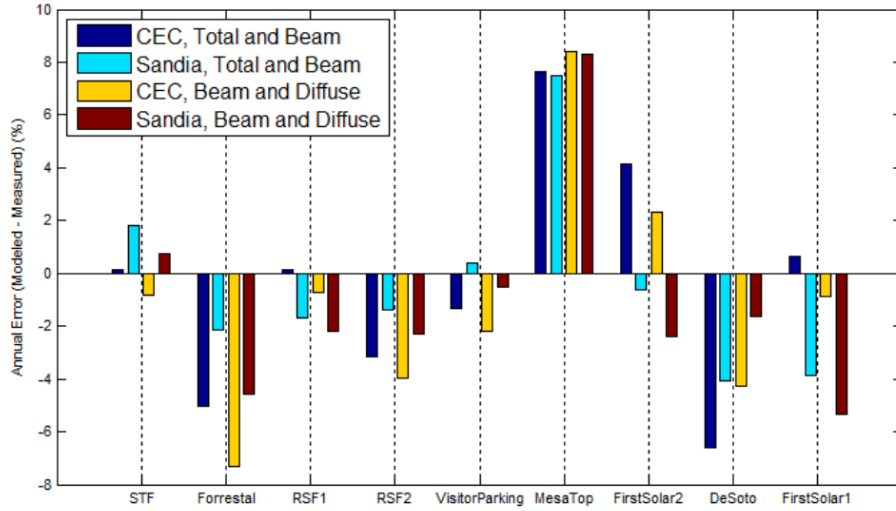


Figura 4.1: Erro anual (modelação-medições) do modelo *Detailed Photovoltaic* usando diferentes módulos e modelos de irradiação [80]

Os autores da validação consideram os valores da raiz do erro quadrático médio horário da ferramenta de modelação PVWatts e no caso da ferramenta PV*SOL para o sistema Mesa Top do como sendo *Outliers*. O mesmo se passa com o erro anual. No caso do PV*SOL, existem limitações na modelação do sistema de seguimento solar uniaxial. O PVWatts assume que os sistemas de seguimento solar uniaxial não têm sombreamento, o que não é uma consideração correta. Este fato é apoiado pelos *outliers* já mencionados.

A **figura 4.2** mostra que, excluindo os *Outliers* já considerados, a raiz do erro quadrático médio horário é inferior a 7%.

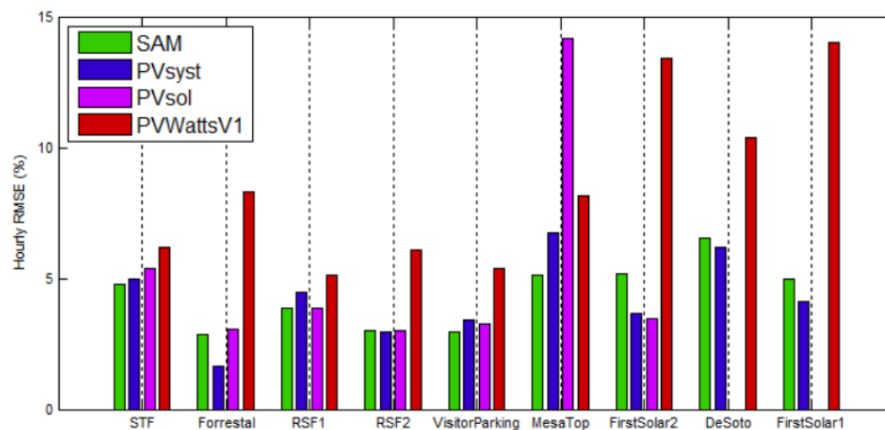


Figura 4.2: Raiz do erro quadrático médio horário das diferentes ferramentas de modelação [80]

Fatores de perda e redução

As várias opções de modelação ou submodelos do SAM não levam em consideração todos os fenómenos que ocorrem no sistema. Enquanto que fenómenos como perdas térmicas, que afetam diretamente o desempenho do sistema, são considerados no algoritmo da modelação, fenómenos como perdas de potência por efeito de Joule ao nível dos fios e pontos de conexão e perdas causadas por sujidade não são diretamente modelados; em vez disso é assumido, em forma de coeficiente, o efeito que esse determinado fenómeno terá na *performance* do sistema, com base em testes de validação. Essa perda, ou fator de redução, é obviamente importante para a obtenção de uma modelação mais próxima da realidade.

É importante referir que, o modelo PVWatts usado no estudo de validação tinha a peculiaridade de fornecer um fator de redução único, que representaria todos os diferentes tipos de perdas no sistema. O valor definido, por defeito, pelo software é 0.77. Os autores da validação consideraram, no entanto 0.79. De acordo com o descrito este valor foi assim definido porque, para fins comparativos, não consideraram perdas por disponibilidade do sistema (perdas relacionadas com paragem devido a manutenção, reparações, etc.) [80].

Inputs e Outputs

Para o modelo *Detailed Photovoltaic*, os **inputs** são os seguintes:

Localização - O SAM possui uma base de dados de ficheiros climáticos. Em alternativa, o utilizador pode carregar dados climáticos, nos formatos admitido;

Módulo - Aqui é indicado o tipo de painel ou painéis fotovoltaicos que se pretende usar na simulação. Mais uma vez, o software fornece uma base de dados bastante extensa;

Inversor - O tipo de inversor pode ser selecionado de uma lista;

Design do sistema - Pode-se definir o número de painéis e inversores, selecionar a integração de um sistema de seguidor solar, até dois eixos;

Sombreamento e Neve - Parâmetros associados ao sombreamento e à neve podem ser definidos nesta secção a fim de serem considerados na simulação;

Perdas - Perdas associadas com irradiação, perdas de Corrente Alternada (AC) e Corrente contínua (DC) assim como perdas no transformador podem ser consideradas e definidas pelo utilizador.

Os principais **outputs** são os seguintes:

Energia anual (ano 1) - Produção elétrica, em kWh, no primeiro ano;

Fator de capacidade - (*Capacity factor*) É o rácio entre a produção simulada para o primeiro ano e o *output* nominal do sistema, que é equivalente à quantidade de energia que o sistema produziria se funcionasse à potência nominal durante o ano inteiro, dado pela expressão:

$$\text{Fator de Capacidade} = \frac{\text{Produção anual de energia (kWhac/ano)}}{\text{Potência do sistema (kWdc)} \times 8760(h/\text{ano})} \quad (4.1)$$

Rácio de performance - é o resultado entre a produção elétrica anual em AC e a capacidade nominal em DC, considerando os recursos solares na localização assim como o sobreamento e a sujidade do sistema.

Existem mais resultados que podem ser obtidos da simulação, e o software pode ir ao detalhe horário em alguns dados, mas no âmbito deste trabalho, interessa apenas a energia anual.

Diferenças nos valores de referência das perdas, nas versões do software

A versão 2017.1.17, usada no âmbito deste trabalho, adiciona o coeficiente de perdas DC (*DC power optimizer loss*) à lista de perdas possíveis de considerar na modelação. O *Set-up/External Transformer* é removido e duas opções, *Transformer no load loss* e *Transformer load loss*, completam e discretizam ainda mais as perdas relativas à corrente alternada. Os valores definidos por defeito constam da tabela 4.1. O **Coeficiente de redução ambiental** representa as perdas médias anuais por sujidade dos módulos fotovoltaicos, o **Coeficiente de redução DC** é o somatório das perdas relacionadas com as ligações DC consideradas no modelo. O mesmo método é usado para calcular o **Coeficiente das perdas nas ligações AC**.

Default System Derates	SAM (Ver. 2014.1.14)	SAM (Ver. 2017.1.17)
Perdas médias anuais por sujidade	5%	5%
Coeficiente de redução ambiental	0.95	0.95
Discrepância de módulos	2%	2%
Díodos e ligações	0.5%	0.5%
Cablagem DC	2%	2%
Erro do sistema seguidor	0%	0%
Nameplate	0%	0%
Perdas por otimização DC	N/A	0%
Coeficiente de perdas nas ligações DC	0.96	0.96
Perdas na Cablagem DC	1%	1%
Set-up/External Transformer	0%	NA%
Perdas do transformador (sem carga)	NA	0%
Perdas do Transformador	NA	0%
Coeficiente de perdas nas ligações AC	0.99	0.99

Tabela 4.1: Perdas definidas por defeito (Modelo *Detailed Photovoltaic*).

Qualquer um destes valores pode ser alterado, por forma a potenciar a precisão da modelação, especialmente no caso de um utilizador com acesso a dados históricos da *performance* de sistemas com características similares.

4.1.2 Modelo Solar térmico

O SAM possui um modelo solar térmico. De acordo com a documentação do SAM já citada, trata-se da modelação de um coletor plano em circuito fechado que transfere energia solar a partir do fluido de trabalho para a água, através de um permutador de calor. Este

modelo é tipicamente usado em climas que atingem temperaturas negativas. O fluido, por defeito, é o glicol. Água do tanque solar é normalmente usada para pre-aquecer água num tanque auxiliar, reduzindo assim a quantidade de calor necessário para aquecer água à temperatura desejada. A NREL fornece uma apresentação do modelo [81]. A figura 4.3 mostra um esquema do modelo considerado.

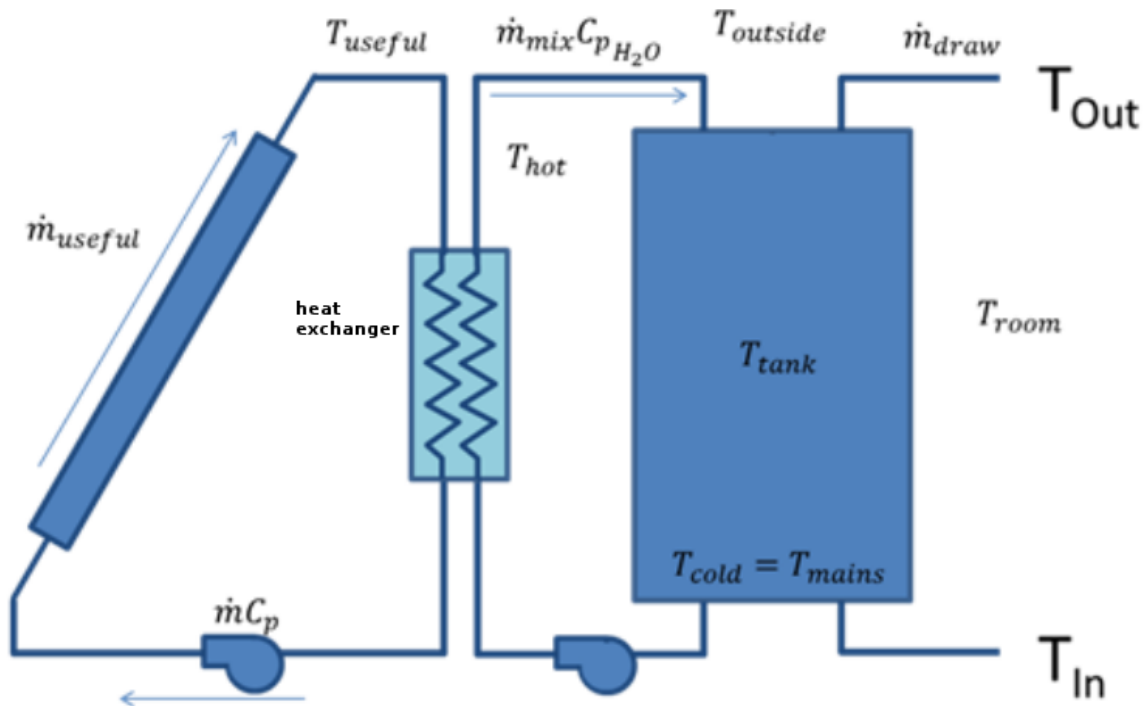


Figura 4.3: Esquema do modelo de Água Quente Solar usado pelo SAM (Figura do manual, já citado)

Inputs e Outputs

Os inputs são os seguintes:

Localização - Os ficheiros climáticos da base de dados do SAM contêm dados sobre a incidência de radiação, direção e velocidade do vento, pressão e temperatura para uma quantidade considerável de cidades, que são usados na simulação;

Sistema - Aqui o utilizador pode definir a utilização anual de água, através da definição de uma média diária ou com a introdução de um perfil anual de uso de água. Também pode definir a inclinação do painel, o caudal do fluido, o fluido usado, e a tecnologia usada. Existe também a possibilidade de definir os parâmetros do coletor;

Os principais *outputs* são os seguintes:

Poupança anual de energia (ano 1) - energia total poupada, no primeiro ano, em kWh;

Fração solar - É razão entre a energia solar e a energia total transferida para o tanque de armazenamento;

Energia auxiliar com solar - *Aux With Solar* É a energia fornecida pelo sistema auxiliar de aquecimento de água para complementar a energia obtida dos coletores solares;

Energia anual sem solar - (*Aux Without Solar*), é a energia que seria necessária para atingir as necessidades de água quente por um sistema de aquecimento de água, sem o sistema solar.

4.1.3 Modelo da Concentração solar com recurso a um espelho parabólico e recurso à tecnologia Stirling

O modelo usado na simulação da tecnologia Stirling foi desenvolvido em 2008 por Paul Fraser, já citado, no âmbito da sua tese de mestrado. O modelo analisa o comportamento de um espelho parabólico, recetor, motor Stirling e consumos parasitas para estimar a potência útil produzida.

Para análise comparativa, o autor usou três anos de dados de um sistema existente, o sistema de 10kW da Wilkinson, Goldberg, and Associates, Inc. (WGA) [82], e 13 modelos diferentes. Dois dos modelos estavam já publicados, o modelo desenvolvido por Stine (1995) e o modelo desenvolvido por Igo e Andraka (2007), na Sandia Labs. Os outros 11 modelos foram desenvolvidos no âmbito da tese de Fraser. Para simulação dos modelos, foi usado o *Transient System Simulation Tool* (TRNSYS), um *software* para simulação de sistemas transientes.[83]

Dos 11 modelos, o que produziu resultados mais próximos aos dados fornecidos pela WGA foi o modelo do número de Beale. A tabela 4.2 e a tabela 4.3 mostram, respetivamente, o erro médio de viés e a diferença média da potência entre os dados obtidos e cada um dos três modelos.

	Mean Bias Error [%]		
	Beale#,max,pwr	Igo & Andraka(2007)	Stine(1995)
Day used for performance curve fit	[%]	[%]	[%]
26/04/2004	3.52	5.35	4.30
27/04/2004	-2.59	0.84	0.16
02/06/2003	5.93	9.72	9.15
24/07/2003	-4.14	1.5	3.05
09/12/2003	3.25	-5.96	-6.99
13/01/2004	-1.12	-7.25	-8.83
Média	0.81	0.70	0.14
Desvio padrão	3.98	6.50	6.90

Tabela 4.2: Comparação do erro médio de viés.

Day used for performance curve fit	Average Difference in Power [W]		
	Beale#,max,pwr	Igo & Andraka(2007)	Stine(1995)
26/04/2004	552	564	583
27/04/2004	593	539	574
02/06/2003	581	743	746
24/07/2003	720	545	567
09/12/2003	504	696	760
13/01/2004	514	751	845
Average	577	640	679
Standard Deviation	78	101	120

Tabela 4.3: Comparação da diferença média da potência para os três modelos.

O desvio padrão do erro médio de viés e da diferença média de potência são os melhores indicadores da fiabilidade precisão dos modelos.

Assim, pelas tabelas apresentadas, o modelo do número de Beale tem o valor do desvio padrão mais baixo nos dois casos.

A diferença média de potência para o modelo do número de Beale foi de 577 W. Para o modelo Sandia (Igo & Andraka) o valor obtido foi de 640W e diferença média do modelo de Stine foi de 679 W.

Os resultados mostram que o modelo do número de Beale produz a menor variabilidade entre os três modelos.

A razão da precisão do modelo do número de Beale deve-se aos parâmetros adicionais, dependentes da localização, que ajudam a determinar como varia a eficiência do recetor em função da temperatura, densidade do ar, velocidade do vento e o ângulo de elevação do sol. O desempenho do motor também é determinado em função da temperatura ambiente, velocidade da bomba, do motor da ventoinha, da eficiência do sistema de arrefecimento e da pressão e velocidade do motor. São determinadas também, energias parasitas, (perdas de energia) no sistema de arrefecimento, com base na velocidade de operação, fluido de arrefecimento e temperatura ambiente.

Inputs e Outputs

Os inputs do software para a modelação são os seguintes:

Localização - Os ficheiros usam uma convenção temporal diferente. Segundo o manual, esta convenção tem em consideração o ângulo de irradiação do sol.

Campo Solar - (*Solar Field*) aqui é definida a disposição do sistema, ou seja, o número de coletores, na direção norte-sul e número de coletores na direção este-oeste, e a distância entre coletores, também nas direções norte-sul e este-oeste. Outros fatores relacionados com o sombreamento também são aqui definidos;

Coletor Solar - Aqui se define a área e a refletância do espelho;

Recetor - Parâmetros relacionados com a abertura, isolamento térmico e absorptância podem ser definidos aqui;

Motor Stirling - Nesta secção é definida a potência do motor, temperatura, cilindrada e rotações por minuto. Os coeficientes da curva de Beale e coeficientes da curva de pressão também podem ser alterados;

Energia parasita - Aqui são ajustados os consumos energéticos relacionados com arrefecimento do motor, através da definição das rotações da bomba e das ventoinhas de arrefecimento, temperaturas de funcionamento das mesmas, fluido de refrigeração e eficiências dos sistemas;

Inputs de referência - São usados para o processo iterativo para calcular o erro total para um conjunto de parâmetros.

Em relação aos outputs, o modelo apresenta a energia eléctrica anual produzida no ano 1 e o fator de capacidade.

Este modelo não foi elaborado para analisar a cogeração. No entanto, um dos dados horários que está disponível é a temperatura do fluido de refrigeração à saída e à entrada da fonte fria do motor. Esses dados foram usados neste trabalho para analisar a quantidade de energia térmica rejeitada na fonte fria do motor e assim, ter uma ideia da energia disponível para pré aquecimento de água.

Capítulo 5

Modelação e análise comparativa

Feita uma breve apresentação do *software*, procede-se agora à análise comparativa dos sistemas estudados. Para o efeito, é necessário apresentar estudos de caso com valores que se aproximem o mais possível da realidade de Portugal, nomeadamente no que diz respeito às necessidades de eletricidade e calor de uma habitação. Feita a modelação, a análise económica será efetuada, tendo por base a legislação, fator evidentemente decisivo na determinação da viabilidade da aplicação de qualquer uma destas tecnologias.

5.1 Considerações

Estimativa de consumos médios

Como já foi referido na **secção 2.4.2**, o clima ameno do país, principalmente nas regiões do litoral, onde habita a maioria da população, é um dos fatores que contribui para os baixos consumos de aquecimento e água quente, como apresentado pela Agência para a Energia (ADENE).

Relativamente ao consumo de água quente sanitária, os dados do estudo apresentado mostraram que o consumo unitário de água quente por habitação em 2013 foi de aproximadamente 0,2 tep/hab, como apresentado na **figura 5.1**. O documento refere que a fonte primária usada para o efeito é o gás de petróleo liquefeito.

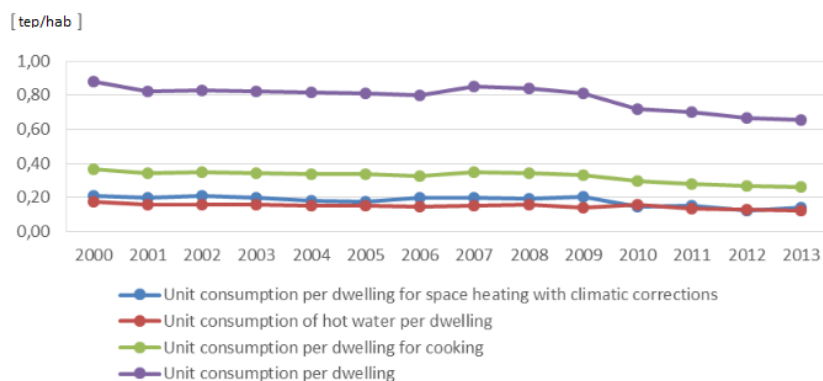


Figura 5.1: Consumo unitário de energia por habitação, em Portugal (tep/habitação) [84]

No entanto, o cálculo do consumo energético será baseado na alínea c) do artigo 14.º do capítulo V do decreto-lei n.º 80/2006, que define que "O consumo de referência de água quente sanitária para utilização em edifícios de habitação é de 40L de água quente a 60°C por pessoa e por dia" [85].

Os valores de necessidade de energia elétrica que serão usados neste trabalho baseiam-se no valor do consumo unitário de eletricidade por habitação (clima corrigido), 3200 kWh/habitação apresentado na **figura 5.2**.

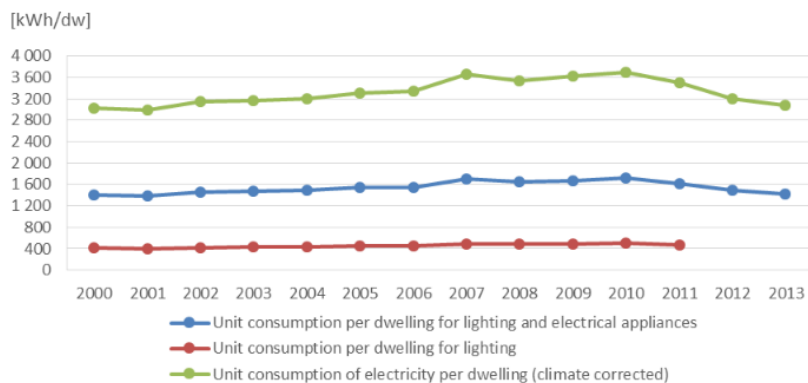


Figura 5.2: Consumo unitário de eletricidade por habitação em Portugal (kWh/habitação) [84]

O cálculo da intensidade energética com correção climática, é um método adotado por algumas entidades com o intuito de excluir invernos atípicos, quer sejam demasiado frios ou demasiado amenos quando comparados com a média. De acordo com a definição fornecida pela ODYSEE[86], "esta correção é particularmente importante quando há grandes variações climáticas de um inverno para outro"

Comparando com valores mais recentes, fornecidos pela PORDATA, o consumo doméstico anual de energia elétrica *per capita* para 2015 (valor provisório) foi de 1156,1 kWh [87]. Tendo em conta que o número médio de residentes nos alojamentos em 2011 é de 2,6 [88], resulta num valor de 3005,86 kWh/habitação, um valor coerente com os valores fornecidos pela ADENE. O valor de partida usado para dimensionar os sistemas a ser comparados será o fornecido pela ADENE.

Análise climática para estimativas iniciais

De acordo com o Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) o clima em Portugal continental é classificado em[89]:

Csa - clima temperado com Verão quente e seco nas regiões interiores do vale do Douro (parte do distrito de Bragança), assim como nas regiões a sul do sistema montanhoso Montejunto-Estrela (exceto no litoral oeste do Alentejo e Algarve).

Csb - clima temperado com Verão seco e suave, em quase todas as regiões a Norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela e nas regiões do litoral oeste do Alentejo e Algarve.

Numa pequena região do Baixo Alentejo, no distrito de Beja, encontra-se Clima Árido - Tipo B, Subtipo BS (clima de estepe), variedade BSk (clima de estepe fria da latitude média). A **figura 5.3** mostra a distribuição climática, segundo o modelo de Köppen.

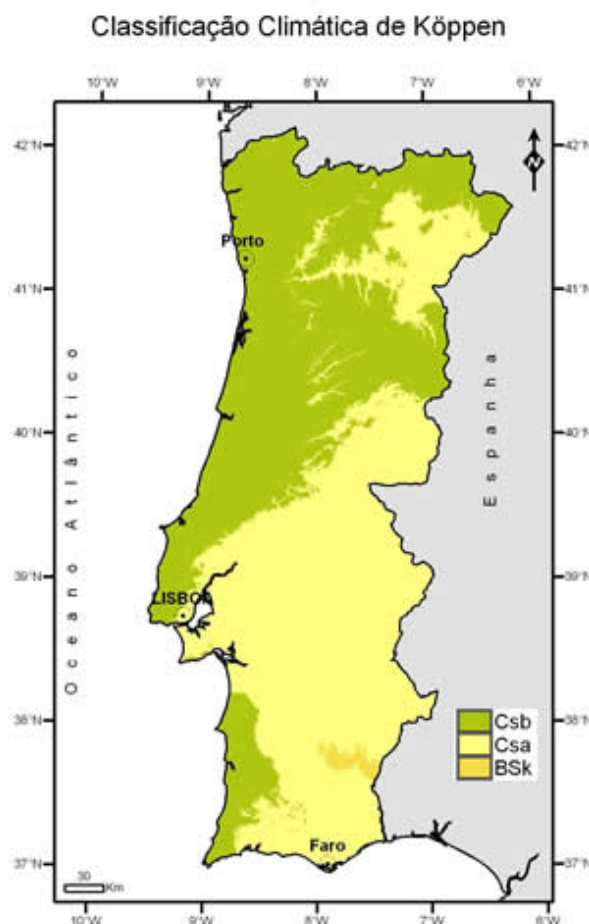


Figura 5.3: Clima em Portugal, de acordo com a Classificação climática de Köppen .

O SAM possui ficheiros climáticos de 5 zonas de Portugal, que se distribuem pelos dois principais climas, como consta da **tabela 5.1**. Tendo em conta o número de horas de exposição solar e o consumo médio de eletricidade por habitação, é feita uma estimativa da potência mínima necessária para suprir as necessidades, através da conversão de energia solar para elétrica, também apresentados na **tabela 5.1** [90, 91, 92, 93, 94]. Obviamente que estes valores funcionam apenas como ponto de partida. A eficiência de conversão não é 100%. Além disso, para se obter um valor mais correto, fatores climáticos como a altitude, velocidade do vento e temperatura ambiente serão tidos em conta nas simulações.

É necessário salientar que, de acordo com o IPMA, parte do Clima em Bragança é categorizado no clima Csa. A relevância desse fato será considerado na análise de resultados.

Por fim convém referir a disponibilidade dos dados. O site refere que "Os dados dis-

poníveis são uma medida para a frequência de dados não registados. Se os dados disponíveis são elevados, isto corresponde a pequenos dados em falta e vice-versa. Se os dados disponíveis são reduzidos, os correspondentes valores podem ser não muito precisos.”

A disponibilidade mensal dos dados, ou seja o número de dias em que foram feitas medições com sucesso, representada em percentagem, obriga à seleção de anos em que esse valor é suficientemente relevante para garantir uma melhor aproximação. Esse fato, aliado ao fato de poderem existir erros de medição, também mencionados pelo site, levaram a que o valor mínimo considerado fosse de 90%.

Cidade	Clima	Total de horas de sol	Potência elétrica mínima (kW)
Bragança	Csa	2511,0 (2016)	1,27
Coimbra	Csb	2604,8 (2015)	1,23
Évora	Csa	2176,1 (2015)	1,47
Faro	Csa	2750,1 (2016)	1,16
Porto	Csb	2681,9 (2012)	1,19

Tabela 5.1: Categorização do clima das localidades disponíveis na ferramenta de simulação, correspondente total de horas de sol e potências de produção elétrica mínimas necessárias.

De seguida, é necessário considerar cada um dos casos possíveis, de acordo com a legislação vigente, nomeadamente o artigo 5º do decreto lei n.º 153/2014 (Requisitos para acesso ao registo). Essas limitações são evidenciadas na seção seguinte.

5.2 Apresentação do estudos de Caso

São analisados os seguintes estudos de caso:

Caso 1: Residência com **duas** pessoas, com Potência contratada de **3,45kVA**;

Caso 2: Residência com **três** pessoas, com Potência contratada de **4,6kVA**;

Caso 3: Residência com **cinco** pessoas, com Potência contratada de **6,9kVA**;

O sistema de produção separada de eletricidade e calor será composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos e um conjunto de painéis solares térmicos. O sistema fotovoltaico não tem armazenamento enquanto que o sistema solar térmico é usado numa perspectiva de redução de custos associados a um sistema de aquecimento de água com recurso a um cilindro.

O sistema de Cogeração é composto por um concentrador solar, um motor Stirling e o sistema de refrigeração está ligado a um sistema de aquecimento de água com recurso a um cilindro para pré aquecimento de água.

Cada um destes casos será analisado em cada uma das cinco cidades disponíveis no software. As necessidades energéticas serão mantidas de cidade para cidade, sendo os valores apresentados na **tabela 5.2**. Estes valores foram determinados com base nas considerações abordadas de 40L de água quente por dia, por pessoa e 1156.1kWh/ano de consumo de energia elétrica por pessoa.

Relativamente à água quente, a produção será comparada com produção de água quente com recurso a um sistema de aquecimento de água elétrico. Isto deve-se ao fato de o cálculo da poupança de energia na simulação de painéis solares térmicos do SAM fazer comparação com um sistema de aquecimento com resistências.

Uma vez que se trata de sistemas que convertem energia com recurso a fontes solares, a tarifa usada será a bi-horária.

Estudo de caso	Consumo elétrico (kWh/ano)	Consumo de água quente (L/dia)
1	2312.2	80
2	3468.3	120
3	5780.5	200

Tabela 5.2: Consumos anuais para cada estudo de caso considerado

5.3 Autoconsumo Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico escolhido para a simulação foi o AC-250P/156-60S [100](tabela 5.3). A quantidade de módulos é mantida de cidade para cidade excepto nos casos em que excede o limite estipulado por lei, definido nas alíneas b) e c) do artigo 5.º do Decreto-lei n.º153/2014, já abordado neste trabalho. Foi feita análise com e sem seguidor solar de dois eixos. Todos os outros parâmetros foram mantidos com os valores de defeito.

Potência nominal (P_{ot})	250
Voltagem nominal (V)	30,70
Corrente nominal (I)	8,18
Eficiência de Conversão (%)	15,40
Dimensões (Altura x Largura x Espessura (mm))	1640 x 990 x 35

Tabela 5.3: Módulo fotovoltaico AC-250P/156-60S - Dados (em condições padrão) irradiância 1000 watt/m², temperatura da célula - 25°C

O inversor usado é o da Fronius Galvo [101]. A escolha da potência foi adequada a cada caso. Os dados dos diferentes inversores estão apresentados na **tabela 5.4**.

Foi feita a simulação tanto para um sistema sem seguidor solar, como para um sistema com seguidor solar. Rapidamente se conclui que, apesar de um sistema com seguidor solar obter uma produção anual superior, o custo inicial é tão elevado que aumenta muito o retorno do investimento. Isso torna esta opção pouco interessante do ponto de vista económico.

Modelo GALVO	1.5-1	2.0-1	3.1-1
Potência nominal AC (W)	1500	2000	3100
Corrente máxima de entrada (A)	13,3	17,8	20,7
Tensão mínima de entrada (V)	120		165
Potência máxima de saída (Pot_a)	1500	2000	3100
Corrente de saída AC (A)	6,5	8,7	13,5
Ligação à rede (gama de tensão)	1 NPE 230 V (+17% / -20 %)		
Frequência	50 Frequência (Hertz) (f) / 60 f		
Fator de Potência	0,85		

Tabela 5.4: Dados dos inversores usados na simulação

De acordo com os cálculos iniciais da **tabela 5.2**, e tendo em conta a alínea c) do artigo 5.º do Decreto-lei n.º 153/2014, já abordado, os valores da potência instalada máxima permitida para cada um dos seguintes casos são os apresentados na **tabela 5.5** assim como os valores para potência fotovoltaica que foram definidos para a simulação.

As **tabelas 5.6, 5.7 e 5.8**, apresentam os resultados das simulações, com e sem seguidor solar, e a diferença entre a produção dos sistemas, em percentagem. É importante referir que, apesar de não exceder os limites legais, o sistema aplicado no caso 1, em Faro, excede as necessidades energéticas em 174kWh/ano. O excedente é vendido à rede, o que resulta numa redução do retorno de investimento.

	Potência contratada (kVA)	Potência máx. permitida (kW)	Potência instalada (kW)
Caso 1	3,45	1,725	1,5
Caso 2	4,6	2,3	2
Caso 3	6,9	3,45	3,1

Tabela 5.5: Potência máxima permitida para UPAC e potência instalada, para cada caso

Caso 1					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
nº Módulos (0.25kW/un.)	6	6	6	6	6
Produção anual c/ seguidor (kWh/ano)	2115	2072	2250	2486	2102
Produção anual s/ seguidor (kWh/ano)	2760	2646	2923	3298	2697
Diferença entre sistemas (%)	23,3	21,6	23	24,6	22

Tabela 5.6: **Caso 1** - Modelação fotovoltaica

Caso 2					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
n°Módulos (0.25kW/un.)	8	8	8	8	8
Produção anual c/ seguidor (kWh/ano)	2842	2785	3029	3344	2832
Produção anual s/ seguidor(kWh/ano)	3699	3548	3926	4427	3624
Diferença entre sistemas(%)	23,1	21,5	22,8	24,5	21,8

Tabela 5.7: **Caso 2** - Modelação fotovoltaica

Caso 3					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
n°Módulos (0.25kW/un.)	12	12	12	12	12
Produção anual c/ seguidor (kWh/ano)	4300	4216	4581	5051	4284
Produção anual s/ seguidor(kWh/ano)	5580	5354	5920	6669	5467
Diferença entre sistemas(%)	22,9	21,2	22,6	24,3	21,6

Tabela 5.8: **Caso 3** - Modelação fotovoltaica

5.4 Pequena Produção Fotovoltaica

A potência máxima foi definida por forma a cumprir as alíneas b) e d) do artigo 5.º do decreto-lei n.º154/2014. Como essa limitação se baseia no consumo anual energético da habitação, a **tabela 5.9** apresenta as necessidades energéticas anuais, os valores máximos de produção permitidos, e o valor definido. Nos casos 1 e 3, foram usados dois inversores Fronius Galvo 2.0-1 e 3.1-1, respetivamente

	Consumo anual (kWh/ano)	Produção máx. permitida (kWh/ano)	Potência Instalada (kW)
Caso 1	2312,2	4624,4	3,1
Caso 2	34683	6936,6	4
Caso 3	5780,5	11561	6,2

Tabela 5.9: Potência instalada para as UPP

As **tabelas 5.10, 5.11 e 5.12** apresentam os resultados das simulações para unidades de Pequena Produção. De referir que no caso 1, na cidade de Faro, houve a necessidade de reduzir o número de painéis fotovoltaicos, pois a produção excedia o máximo permitido por lei. As simulações com seguidor solar excediam a produção anual permitida por lei. Além disso as configurações possíveis resultavam em retornos do investimento muito elevados o que torna esta opção economicamente inviável. Por essa razão esses resultados não são apresentados.

Caso 1 Cidade	n°Módulos (0,25kW/un.)	Produção anual (kWh/ano)	Excedente a vender(kWh/ano)
Bragança	12	4300	1987,8
Coimbra	12	4216	1903,8
Évora	12	4581	2268,8
Faro	10	4191	1878,8
Porto	12	4284	1971,8

Tabela 5.10: **Caso 1** - Modelação fotovoltaica (UPP)

Caso 2 Cidade	n°Módulos (0.25kW/un.)	Produção anual (kWh/ano)	Excedente a vender(kWh/ano)
Bragança	16	5683	2214
Coimbra	16	5570	2101
Évora	16	6058	2589
Faro	16	6687	3218
Porto	16	5663	2194

Tabela 5.11: **Caso 2** - Modelação fotovoltaica (UPP)

Caso 3 Cidade	n°Módulos (0.25kW/un.)	Produção anual (kWh/ano)	Excedente a vender(kWh/ano)
Bragança	24	8599	2818
Coimbra	24	8431	2650
Évora	24	9161	3380
Faro	24	10101	4320
Porto	24	8568	2787

Tabela 5.12: **Caso 3** - Modelação fotovoltaica (UPP)

5.5 Solar Térmico

Como já foi mencionado, a modelação do sistema solar térmico tem como base o consumo unitário de 40 litros de água quente por pessoa e por dia.

O Coletor solar térmico usado na simulação é o Logasol SKS 4.0-S, produzido pela Buderus (Bosch), cujas características técnicas constam da base de dados do *software*. A **tabela 5.13** apresenta alguns desses dados.

Modelo	Logasol SKS 4.0 S
Tipo de montagem	Vertical
Dimensões (mm)	1145 x 2070 x 90
Área total (m²)	2,4
Área de Absorção (m²)	2,1
Fator de Eficiência (η)	0,851
Pressão máxima (bar)	10

Tabela 5.13: Características técnicas do coletor solar (ver **Apêndice A**)

Como já foi referido na **secção 4.1.2** os ficheiros climáticos contêm informação, entre outras coisas, sobre condições de incidência de radiação, temperatura do bolbo seco e bolbo húmido e velocidade e orientação do vento. Isto garante que os fatores ambientais são tidos em conta na simulação.

As **tabelas 5.14, 5.15 e 5.16** apresentam a capacidade térmica de produção, as necessidades anuais de energia para o consumo de água quente de referência para cada caso, e a capacidade de produção do sistema solar térmico, que acaba por se traduzir na poupança anual de energia elétrica.

Caso 1					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
n° de Coletores	2	2	2	2	2
Capacidade de Produção (kW_t)	2,95	2,95	2,95	2,95	2,95
Energia necessária (Wh_{el}/ano)	1331,8	1232	1216,1	1149,8	1267
Poupança anual (Wh_{el}/ano)	1081	1023	1015	1020	1047

Tabela 5.14: **Caso 1** - Modelação do sistema solar térmico

Caso 2					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
n° de Coletores	4	4	4	4	4
Capacidade de Produção (kW_t)	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
Energia necessária (Wh_{el}/ano)	1997,7	1848	1824,1	1724,7	1900,4
Poupança anual (Wh_{el}/ano)	1760	1662	1650	1611	1693

Tabela 5.15: **Caso 2** - Modelação do sistema solar térmico

Caso 3					
Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
n° de Coletores	8	8	8	8	8
Capacidade de Produção (kW_t)	11,78	11,78	11,78	11,78	11,78
Energia necessária (Wh_{el}/ano)	3329,6	3079,9	3040,2	2874,5	3167,4
Poupança anual (Wh_{el}/ano)	2985	2853	2846	2754	2881

Tabela 5.16: **Caso 3** - Modelação do sistema solar térmico

5.6 Cogeração Stirling

O sistema usado na modelação no caso da cogeração, já brevemente abordado na **secção 2.2**, é o sistema de seguidor solar da INRESOL com o motor Stirling V2-6SX. Os parâmetros de simulação relativos s temperaturas, rotações por minuto (rpm), potência e volume foram alterados para os dados fornecidos pelo produtor. O Coletor solar tem uma área de $60m^2$ e uma refletividade de 0.97. Devido à amplitude de temperaturas em Portugal, o fluido de arrefecimento foi mudado para uma solução de etilenoglicol a 25% [102, 103]. Todos os outros parâmetros de simulação foram mantidos nos valores de defeito, excepto a potência da bomba, que foi alterada de 150W para 0W, porque este sistema passa a fazer parte do sistema de pré-aquecimento de AQS. As características deste sistema são apresentadas na **tabela 5.17**.

Motor Stirling	Tipo Gama 446 cm ³
Fluido de Trabalho	Nitrogénio
Gerador	5 kW íman permanente 110-240 VAC (48A) 50-60Hz monofásico
Fonte quente	400 - 1100°C
Rotação nominal	1200 rpm
Eficiência (electrica)	22-38%, dependendo da aplicação e temperaturas
Eficiência (CHP)	88-94%, dependendo da aplicação e temperaturas
Tensão de saída (DC)	4 * 12V, 30A e 1 * 300V, 20A
Tensão de saída (AC)	110 - 240 V, 25 - 55A, monofásico (50-60Hz), ou 400V, 16A trifásico
Inversor	10kW sinusoidal puro. conversor DC/DC + DC-bus + ponte H + filtro
Tensão de entrada (DC)	300-500 V com circuito MPPT para tecnologia solar e eólica
Capacidade da Bateria	300V, 2.5Q (Passível de ser aumentada)
Periodicidade de Manutenção	90000 horas ou approx. 10 anos
Certificações	UL, CE, CIE

Tabela 5.17: Características técnicas do motor Stirling GENIOUSTM V2-6 da INRESOL.

Por não haver limitações à potência instalada, a potência definida é a mesma para todos os casos. A **tabela 5.18** demonstra os resultados obtidos e os excedentes em cada caso.

Cidade	Bragança	Coimbra	Évora	Faro	Porto
Produção (kWh/ano)	7651	7043	6909	9324	7043
Excedente Caso 1 (kWh/ano)	5329,8	4721,8	4587,8	7002,8	4769,8
Excedente Caso 2 (kWh/ano)	4173,7	3565,7	3431,7	5846,7	3613,7
Excedente Caso 3 (kWh/ano)	1861,5	1253,5	1119,5	3534,5	1301,5

Tabela 5.18: Modelação do Sistema de cogeração Stirling para os três casos

Cálculo da Energia térmica disponível para pré-aquecimento de AQS

Como já foi referido, apesar de o software não fazer modelação de um sistema de cogeração, é possível obter dados do comportamento do sistema. Para ter uma ideia do calor que pode ser rejeitado no processo de arrefecimento do motor, foram extraídos os dados referentes à temperatura de entrada e saída do fluido do motor a todas as horas de um ano. A figura 5.4 mostra um excerto desses dados:

The screenshot shows the Stirling software interface with the 'Data tables' tab selected. The left sidebar lists various parameters under 'Reference Inputs'. The main table displays data for 'Cooling fluid temperature - cooler in/tower out' and 'Cooling fluid temperature - cooler out/tower in' in degrees Celsius, along with 'Engine power output (gross)' and 'Engine power output (net)' in kW. The data is organized into 'Single Values' and 'Hourly Data' sections. The 'Hourly Data' section shows data for January 1st and 2nd, with times ranging from 12:00 am to 12:00 pm.

Time	Cooling fluid temperature - cooler in/tower out (C)	Cooling fluid temperature - cooler out/tower in (C)	Engine power output (gross) (kW)	Engine power output (net) (kW)
Jan 1, 12:00 am	4.00552	4.00508	0	0
Jan 1, 01:00 am	4.80552	4.80507	0	0
Jan 1, 02:00 am	5.20551	5.20506	0	0
Jan 1, 03:00 am	5.3055	5.30505	0	0
Jan 1, 04:00 am	5.10549	5.10505	0	0
Jan 1, 05:00 am	5.00549	5.00504	0	0
Jan 1, 06:00 am	4.50548	4.50503	0	0
Jan 1, 07:00 am	4.10547	4.10502	0	0
Jan 1, 08:00 am	3.80546	3.80501	0	0
Jan 1, 09:00 am	5.30549	5.30505	0	0
Jan 1, 10:00 am	6.70552	6.70507	0	0
Jan 1, 11:00 am	8.20555	8.20511	0	0
Jan 1, 12:00 pm	8.20555	8.20511	0	0
Jan 1, 01:00 pm	8.20556	8.20511	0	0
Jan 1, 02:00 pm	8.20556	8.20511	0	0
Jan 1, 03:00 pm	8.00556	8.00511	0	0
Jan 1, 04:00 pm	7.80555	7.80511	0	0
Jan 1, 05:00 pm	7.60555	7.6051	0	0
Jan 1, 06:00 pm	7.50555	7.5051	0	0
Jan 1, 07:00 pm	7.50555	7.5051	0	0
Jan 1, 08:00 pm	7.40554	7.4051	0	0
Jan 1, 09:00 pm	7.40554	7.4051	0	0
Jan 1, 10:00 pm	7.40555	7.4051	0	0
Jan 1, 11:00 pm	7.40555	7.4051	0	0
Jan 2, 12:00 am	7.90556	7.90512	0	0
Jan 2, 01:00 am	8.30557	8.30513	0	0
Jan 2, 02:00 am	8.80559	8.80514	0	0
Jan 2, 03:00 am	9.0056	9.00515	0	0
Jan 2, 04:00 am	9.2056	9.20515	0	0
Jan 2, 05:00 am	9.40561	9.40516	0	0
Jan 2, 06:00 am	9.50561	9.50517	0	0
Jan 2, 07:00 am	9.70562	9.70517	0	0
Jan 2, 08:00 am	9.80561	9.80517	0	0
Jan 2, 09:00 am	10.2056	10.2052	0	0
Jan 2, 10:00 am	10.6056	10.6052	0	0
Jan 2, 11:00 am	11.0056	11.0052	0	0
Jan 2, 12:00 pm	11.3056	11.3052	0	0
Jan 2, 01:00 pm	11.5057	11.5052	0	0
Jan 2, 02:00 pm	11.8057	11.8052	0	0
Jan 2, 03:00 pm	11.5057	11.5052	0	0
Jan 2, 04:00 pm	11.3057	11.3052	0	0
Jan 2, 05:00 pm	11.0057	11.0052	0	0
Jan 2, 06:00 pm	10.9057	10.9052	0	0
Jan 2, 07:00 pm	10.7056	10.7052	0	0

Figura 5.4: Excerto da Recolha dos valores das temperaturas do fluido de arrefecimento, para a cidade de Bragança (1 ano)

O excerto do software demonstra que as temperaturas obtidas na maior parte dos casos, por exemplo à uma ou às duas horas da manhã, não têm utilidade. É necessário, portanto uma seleção de dados. Para calcular a energia térmica, foram selecionadas temperaturas do fluido quente superiores a 17°C e variações de temperatura entre a entrada e saída do motor superiores a 5°C. Usando a **equação 5.1**,

$$Q = \dot{m} \times C_p (T_{q,ent} - T_{q,sai}) \text{ (W)} \quad (5.1)$$

É obtida a taxa de transferência de calor. Multiplicando pelo número de horas em que se regista essas temperaturas, resulta a energia térmica total disponível num ano. O calor específico, C_p do etilenoglicol a 25% usado para o cálculo é obtido através da interpolação dos valores tabelados[103]. O caudal, \dot{m} , usado é a média dos caudais dos modelos

referidos no manual do SAM. Os valores obtidos para o calor específico e para o caudal estão apresentados em seguida:

$$C_p(\text{etilenoglicol}@T = 313\text{K}) = 3783\text{J/kg.K} \quad (5.2)$$

$$\dot{m} = 5,7 \times 10^{-4} (\text{kg/s}) \quad (5.3)$$

Os resultados finais são apresentados na **tabela 5.19**. Apesar de os valores parecerem elevados, as temperaturas médias anuais da fonte quente rondam os 40°C, ou seja, os 60°C necessários para os consumos de água quente não são garantidos pelo sistema. O calor rejeitado pelo sistema serve apenas para pré-aquecimento. A **tabela 5.19** apresenta também a energia térmica afetada por 50%, por incluir o sistema de arrefecimento do motor Stirling (a eficiência dada para um arrefecedor é de 70%).

Cidade	Energia(kWh/ano)	Energia ($\eta = 50\%$)
Bragança	5937.75	2968.9
Coimbra	4957.94	2478.87
Évora	5229.96	2614.98
Faro	9212.22	4606.1
Porto	5588.07	2794

Tabela 5.19: Energia Térmica anual rejeitada pelo sistema

5.7 Retorno do Investimento

A **tabela 5.20** mostra o custo por kW, da tecnologia Estes valores incluem o preço dos sistemas de AQS. O custo por kW, no caso da cogeração Stirling é o mesmo em todos os casos, porque o sistema é exatamente o mesmo para todos. Relativamente às UPAC e UPP, ao comparar uma tecnologia, caso a caso, a diferença está no preço da potência por kW dos sistemas, que vai reduzindo com o aumento de potência que se pretende adquirir. Comparando as diferentes tecnologias, UPAC e UPP nos mesmos casos, é possível concluir que o custo superior do sistema fotovoltaico, no caso das UPP dá origem a um custo por kW superior, quando comparado com as UPAC.

A **tabela 5.21** mostra os valores médios do retorno do investimento simples em cada caso. Os gráficos das figuras 5.5 e 5.6 são um complemento visual dos dados já apresentados e apresentam os valores médios dos retornos do investimento para os diferentes casos. A figura 5.7 apresenta os custos iniciais médios para cada um dos casos. É importante mencionar que os preços incluem a tecnologia solar térmica. Também é relevante referir que os preços da tecnologia Stirling foram aumentados em 20%, para cobrir incertezas tais como o preço exato de um seguidor solar de 60m², e o da estrutura dos espelhos.

	UPAC	UPP	Cogeração
Caso 1	1036,28	1130.6	3964
Caso 2	778,8	935,7	3964
Caso 3	625,7	779,06	3964

Tabela 5.20: Custo da tecnologia (€/kW)

	UPAC	UPP	Cogeração
Caso 1	8,28	9,12	16,8
Caso 2	7,72	8,47	14,1
Caso 3	7,44	7,97	10,7

Tabela 5.21: Retorno do Investimento médio nos 3 casos (UPP e UPAC sem seguidor solar) (anos)

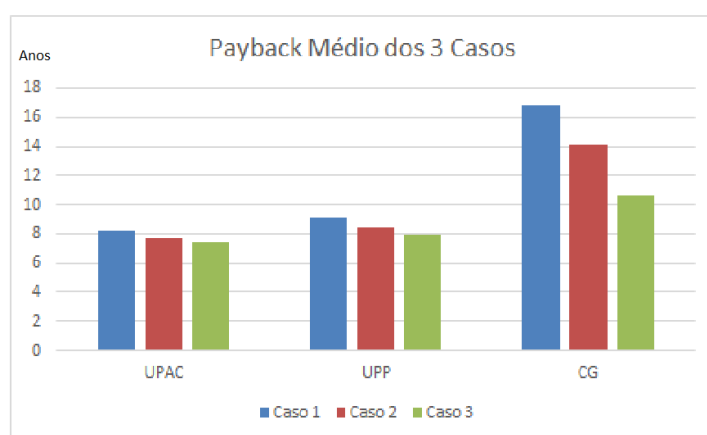


Figura 5.5: Retorno do Investimento (*payback*) médio nos três casos (anos)

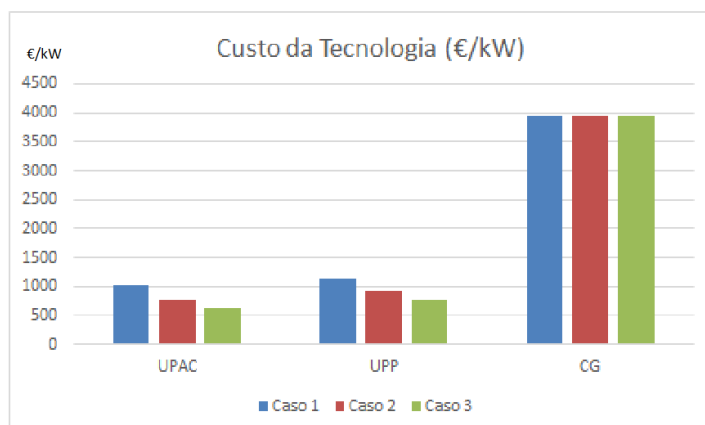


Figura 5.6: Custo da tecnologia (€/kW)

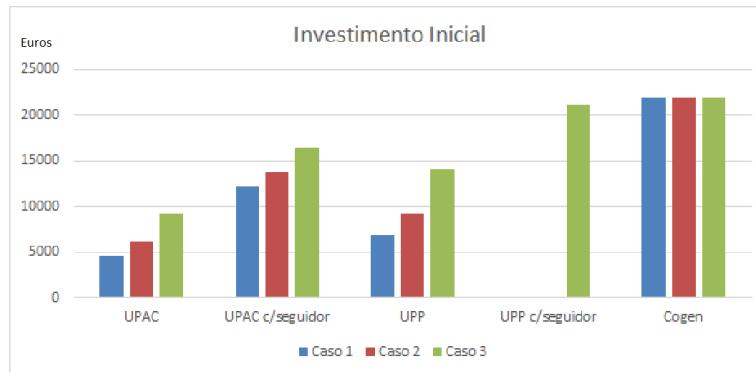


Figura 5.7: Investimento inicial médio nos três casos

A **figura 5.5** mostra que o retorno do investimento médio vai diminuindo, quanto maior a potência em que se investe. estes dados est ao de acordo com o preço por kW , representado na **figura 5.6**. Fica também claro a diferença de preço entre a cogeração e as outras duas modalidades.

A **figura 5.7** apresenta o custo de investimento de todas as tecnologias abordadas neste trabalho. As tecnologias UPAC e UPP com seguidor solar têm custos de investimento elevados. No caso da UPP com seguidor, apenas é apresentada a modelação do caso 3, porque os restantes casos excedem os limites estipulados por lei, como já foi abordado na apresentação da modelação da Pequena Produção e está apresentado mais detalhadamente no **Anexo B**.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões e Trabalhos futuros

As simulações de autoconsumo com um sistema de seguidor solar produzem excedente de energia elétrica. No entanto, o retorno do investimento nessa opção é, em média, 15 anos e o investimento inicial é 14124€. Estes valores mostram que esta opção não é a mais atrativa. Relativamente ao autoconsumo sem seguidor solar, com exceção do caso 1, na cidade de Faro, não existe excedente energético. O excedente neste caso, conciliado com o facto de se produzir toda a energia necessária reduz o retorno do investimento do sistema. Os resultados obtidos na simulação, aplicando o regime do autoconsumo, estão de acordo com o objetivos da legislação portuguesa, que pretende que um sistema que funcione em autoconsumo seja dimensionado, primeiramente, para as necessidades das instalações. O regime mais atrativo em termos de investimento inicial é o autoconsumo, sem seguidor solar. Mesmo que não produza o total de energia necessária, exceto no caso já mencionado, o custo de investimento inicial e o retorno do investimento compensam, comparativamente com as outras modalidades.

A tecnologia de Stirling, apesar de todos os avanços, ainda é cara, quando comparada com as outras duas tecnologias abordadas neste trabalho. O investimento elevado da tecnologia Stirling pode demover muitos investidores, especialmente no âmbito deste estudo, o âmbito do uso doméstico.

O Sistema de cogeração Stirling apresentado apenas se torna economicamente interessante quando há consumos maiores, como demonstrado no caso 3. Em termos de retorno do investimento, uma redução de 30% no custo de investimento torná-la-ia uma opção competitiva no caso 3, e uma redução de 50% torná-la-ia numa opção preferível à produção separada de eletricidade e calor, em qualquer um dos casos apresentados.

6.1.1 Trabalhos Futuros

Por forma a melhorar a modelação da cogeração, propõe-se o uso do *Software development kit*, SDK fornecido pela NREL, para desenvolver um modelo para análise da cogeração, bem como as necessidades instantâneas de calor e eletricidade.

Um tema interessante seria a análise de um sistema de painéis fotovoltaicos em cogeração. Isto seria conseguido através de um sistema que, ao detetar a inexistência de consumo instantâneo, em vez de permitir injeção de energia na rede, aproveitasse essa energia para AQS.

Para trabalho futuro, apresenta-se a sugestão da análise de sistemas de cogeração com uso de sistemas de armazenamento de energia elétrica.

Outra sugestão é o uso de bombas de calor reversíveis para reaproveitar o calor rejeitado no motor Stirling.

Propõe-se também o estudo comparativo do sistema de cogeração Stirling com recurso a gás natural ou pellets, como abordado no estado de arte.

Apêndice A

Valores Tabelados

A.1 preços de componentes usados nas simulações

Artigo	Preço unitário (€)
Painel fotovoltaico 250W	215[104]
Inversor fronius galvo 1.5kW	903.9[105]
Inversor fronius galvo 2kW	1029.89[106]
Inversor fronius galvo 3.1kW	996.89[107]
Estrutura triangular 6 painéis	332.54[108]
Estrutura triangular 8 painéis	359.58[109]
Seguidor solar de 2 eixos $35m^2$ com mastro de 2,2 m	6850[110]
Painel solar térmico Logasol SKS-S	850[111]
INRESOL V26-SX	8000[112]
Preço Placa de alumínio (por m^2)	8,5[113]

Tabela A.1: Preço unitário por artigo

A.2 Preços Tarifa Bi-horária

Potência kVA	Cheio	Vazio [114]
3,45	0,1997€/kW	0,092€/kW
4,6	0,1997€/kW	0,0921€/kW
6,9	0,1998€/kW	0,0921€/kW [115]

Tabela A.2: Preços Tarifa Bi-horária

$$\text{Preço OMIE (a 11nov 2017)} = 0,05173\text{€/kW}[116] \quad (\text{A.1})$$

Apêndice B

Tabelas de Resultados

As tabelas seguintes mostram os resultados das modelações nos casos do autoconsumo, pequena produção e Cogeração, respetivamente. A ogeração stirling inclui o uso do calor rejeitado da fonte fria do motor para pré aquecimento de água e armazenamento num cilindro. Os restantes casos incluem a análise do sistema solar térmico para AQS. Constam das tabelas os preços dos sistemas, bem como as poupanças e o retorno do investimento para cada caso e cada cidade. A tarifa bi-horária foi fixada, considerando o consumo de 75% em horário cheio e 25% em horário vazio. Sempre que o valor de excedente é negativo, significa que a produção de energia não foi suficiente para suprir as necessidades da habitação. O excedente positivo, é vendido à rede. Este excedente é considerado no retorno do investimento, e calculado mediante a tarifa de venda de acordo com as fórmulas apresentadas na secção da legislação.

Autoconsumo

Caso 1: nº de pessoas		2								51.73			
Consumo Eléctrico (kWh/ano)		2312.2		Custo anual da energia elétrica (€/ano)		399.490355		OMIE		0.05173			
Preço Sistema AQS (€)		2085		Preço do sistema PV sem seguidor solar (€)		2526.44							
				Preço do sistema PV com seguidor solar (€)		10126.9							
				Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)		0.172775							
								Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e com painel solar térmico		Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico			
Cidade	Potência contratada (kVA) (pot. lig.)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Energia produzida(kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente(kWh/ano)				
Bragança	3.45	1.5	1081	2115	8.406003111	-197.2	2760	20.11486073	447.8				
Coimbra	3.45	1.5	1023	2072	8.68217784	-240.2	2646	20.63588145	333.8				
Évora	3.45	1.5	1015	2250	8.227216133	-62.2	2923	20.24203803	610.8				
Faro	3.45	1.5	1020	2486	7.545638198	173.8	3298	19.64538453	985.8				
Porto	3.45	1.5	1047	2102	8.532301537	-210.2	2697	20.41096666	384.8				
Caso 2: nº de pessoas		3											
Consumo Eléctrico (kWh/ano)		3468.3		Custo anual da energia elétrica (€/ano)		599.32224							
Preço Sistema AQS (€)		3035		Preço do sistema PV sem seguidor solar (€)		3109.47							
				Preço do sistema PV com seguidor solar (€)		10682.89							
				Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)		0.1728							
								Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e com painel solar térmico				Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico	
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Energia produzida(kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)				
Bragança	4.6	2	1760	2842	7.77381891	-626.3	3699	15.00549765	230.7				
Coimbra	4.6	2	1662	2785	8.046485327	-683.3	3548	15.4094391	79.7				
Évora	4.6	2	1650	3029	7.64512178	-439.3	3926	15.14531506	457.7				
Faro	4.6	2	1611	3344	7.216867668	-124.3	4427	14.87296562	958.7				
Porto	4.6	2	1693	2832	7.906923176	-636.3	3624	15.25699142	155.7				
Caso 3: nº de pessoas		5											
Potência Eléctrica (kWh/ano)		5780.5		Custo anual da energia elétrica (€/ano)		998.8704		0.1635					
Preço Sistema AQS (€)		4935		Preço do sistema PV sem seguidor solar (€)		4375.89							
				Preço do sistema PV com seguidor solar (€)		11509.89							
				Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)		0.1728							
								Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e com painel solar térmico				Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico	
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Energia produzida(kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)				
Bragança	6.9	3.1	2985	4300	7.495194196	-1480.5	5580	11.11117192	-200.5				
Coimbra	6.9	3.1	2853	4216	7.727372168	-1564.5	5354	11.59885567	-426.5				
Évora	6.9	3.1	2846	4581	7.350012504	-1199.5	5920	10.98410122	139.5				
Faro	6.9	3.1	2754	5051	6.989611922	-729.5	6669	10.84664058	888.5				
Porto	6.9	3.1	2881	4284	7.622430234	-1496.5	5467	11.39999885	-313.5				

UPP

Caso 1: nº de pessoas				2		0.1635				82.98	
Consumo Eléctrico (kWh/ano)				2312.2		Custo anual da energia elétrica (€/ano)				378.0447	
						Preço do sistema PV sem seguidor solar				4754.89	
Preço Sistema AQS (€)				2085		Preço do sistema PV com seguidor solar				11509.89	
						Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)				0.172775	
						Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e painel com solar térmico				Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico	
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)			Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Energia produzida(kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente(kWh/ano)
	(pot. lig.)										
Bragança	3.45	3.1	1081	4300			9.10519065	1987.8	5580	N.A.	N.A.
Coimbra	3.45	3.1	1023	4216			9.315903365	1903.8	5354	N.A.	N.A.
Evora	3.45	3.1	1015	4581			8.963036008	2268.8	5920	N.A.	N.A.
Faro	3.45	3.1	1020	4191			9.007212573	1878.8	6669	N.A.	N.A.
Porto	3.45	3.1	1047	4284			9.193329561	1971.8	5467	N.A.	N.A.
Caso 2: nº de pessoas				3		567.06705					
Consumo Eléctrico (kWh/ano)				3468.3		Custo anual da energia elétrica (€/ano)				6218.96	
						Preço do sistema PV sem seguidor solar				NA	
Preço Sistema AQS (€)				3035		Preço do sistema PV com seguidor solar				NA	
						Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)				0.1728	
						Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e painel com solar térmico				Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico	
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)			Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Energia produzida(kWh/ano)	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)
Bragança	4.6	4	1760	5683			8.511532661	2214.7	7938	N.A.	N.A.
Coimbra	4.6	4	1662	5570			8.722622284	2101.7	7096	N.A.	N.A.
Evora	4.6	4	1650	6058			8.417775659	2589.7	7852	N.A.	N.A.
Faro	4.6	4	1611	6687			8.083538298	3218.7	8954	N.A.	N.A.
Porto	4.6	4	1693	5663			8.616439579	2194.7	7248	N.A.	N.A.
Caso 3: nº de pessoas				5		945.11175					
Potência Eléctrica (kWh/ano)				5780.5		Custo anual da energia elétrica (€/ano)				9072.52	
						Preço do sistema PV sem seguidor solar				16169.78	
Preço Sistema AQS (€)				4935		Preço do sistema PV com seguidor solar				0.1728	
						Preço tarifa bi-horária (considerando 75% cheio 25% vazio)					
						Sistema Fotovoltaico sem seguidor solar e painel com solar térmico				Sistema Fotovoltaico com seguidor solar e painel solar térmico	
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Poupança de Energia AQS (kWh/ano)	Energia produzida pelo sistema (kWh/ano)			Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)	Potência simulada(kWh/ano) com seguidor	Payback (anos)	Excedente (kWh/ano)
Bragança	6.9	6.2	2985	8599			8.010900276	2818.5	11159	10.76232898	5378.5
Coimbra	6.9	6.2	2853	8431			8.182883717	2650.5	10709	11.10289525	4928.5
Evora	6.9	6.2	2846	9161			7.908611574	3380.5	11839	N.A.	N.A.
Faro	6.9	6.2	2754	10101			7.640701524	4320.5	13337	N.A.	N.A.
Porto	6.9	6.2	2881	8568			8.106138264	2787.5	10934	10.9672559	5153.5

Excede limites legais

1

Caso 1: nº de pessoas		2					Tref (€/kWh)		82.98	51.73
Consumo Eléctrico (kWh/ano)		2312.2	Custo anual da energia elétrica (€/ano)		378.0447	OMIE (€/kWh)		0.05173		
Preço Sistema AQS (€)		2085	Preço do sistema Stirling		19824	Trefmpc (€)		0.091278		
			Preço tarifa bi-horária (75% cheio 25% vazio)		0.172775	0.1997				
Cidade	Potência contratada (kVA) (pot lig.)	Potência instalada(kW)	Energia Produzida (kWh/ano)	AQS (kWh/ano) (necessidades)	Energia AQS Produzida	Excedente Elec (kWh/ano)	Remuneração do excedente (€/ano)	Payback com remun. de excedente (anos)	Payback com remun. de excedente e prémios	Prémios (regime especial)
Bragança	3.45	5	7651	1331.8	1182.237654	5338.8	276.176124	20.47882668	16.42209596	40.041
Coimbra	3.45	5	7043	1232	987.151806	4730.8	244.724284	21.56354347	17.5456282	35.481
Évora	3.45	5	6909	1216.1	1041.31213	4596.8	237.7934664	21.79289577	17.9773974	34.476
Faro	3.45	5	9324	1149.8	1834.202028	7011.8	362.720414	19.37596062	14.78338785	52.5885
Porto	3.45	5	7043	1267	1112.614476	4730.8	244.724284	21.42263063	17.45222166	35.481
Caso 2: nº de pessoas		3	Custo anual da energia elétrica (€/ano)		567.06705	OMIE (€/kWh)		0.05173		16.80015
Consumo Eléctrico (kWh/ano)		3468.3	Preço do sistema Stirling		19824					
Preço Sistema AQS (€)		3035	Preço tarifa bi-horária (75% cheio 25% vazio)		0.1728					
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Energia Produzida (kWh/ano)	AQS (kWh/ano) (necessidades)	Energia AQS Produzida	Excedente Elec (kWh/ano)	Remuneração do excedente (€/ano)	Payback com remun. de excedente (anos)	Payback com remun. de excedente e prémios	Prémios (regime especial)
Bragança	4.6	5	7651	1997.7	1182.237654	4182.7	216.371071	15.80617797	13.7773741	31.37025
Coimbra	4.6	5	7043	1848	987.151806	3574.7	184.919231	16.56315889	14.65212409	26.81025
Évora	4.6	5	6909	1824.1	1041.31213	3440.7	177.9847411	16.71566689	14.42833562	25.80535
Faro	4.6	5	9324	1724.7	1834.202028	5855.7	302.915361	15.32511329	12.73243169	43.91775
Porto	4.6	5	7043	1900.4	1112.614476	3574.7	184.919231	16.43879426	14.5549289	26.81025
Caso 3: nº de pessoas		5	Custo anual da energia elétrica (€/ano)		945.11175	OMIE (€/kWh)		0.05173		14.11197888
Potência Eléctrica (kWh/ano)		5780.5	Preço do sistema Stirling		19824					
Preço Sistema AQS (€)		4935	Preço tarifa bi-horária (75% cheio 25% vazio)		0.1728					
Cidade	Potência contratada (kVA)	Potência instalada(kW)	Energia Produzida (kWh/ano)	AQS (kWh/ano) (necessidades)	Energia AQS Produzida	Excedente Elec (kWh/ano)	Remuneração do excedente (€/ano)	Payback com remun. de excedente (anos)	Payback com remun. de excedente e prémios	Prémios (regime especial)
Bragança	6.9	5	7651	3329.6	1182.237654	1870.5	96.760965	10.85365381	10.42078581	14.02875
Coimbra	6.9	5	7043	3079.9	987.151806	1262.5	65.309125	11.5158326	11.0185194	9.46875
Évora	6.9	5	6909	3040.2	1041.31213	1128.5	58.377305	11.40562528	11.14297956	8.46375
Faro	6.9	5	9324	2874.5	1834.202028	3543.5	183.305255	10.80689342	9.966930593	26.57625
Porto	6.9	5	7043	3167.4	1112.614476	1262.5	65.309125	11.21900452	10.92670514	9.46875

Bibliografia

- [1] Beale William, *Understanding Stirling Engines*, Volunteers in Technical Assistance, 1985
http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnaas739.pdf
- [2] Simon Fraser University (SFU), *Stirling Cycle*,
<http://www.sfu.ca/~mbahrami/ENSC%20461/Notes/Stirling%20Cycle.pdf>
- [3] Fraser Paul, *Stirling Dish System Performance Prediction Model*, University of Wisconsin-Madison 2008
https://www.nrel.gov/analysis/sam/pdfs/thesis_fraser08.pdf
- [4] Incorpera et. al, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6th edition, John Wiley & sons, Inc. 2007
- [5] Stine, W. B., and Frank Kreith, eds. *Mechanical Engineering Handbook*, Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [6] *Motor Stirling Cinemático (tipo Beta)*
https://pt.wikipedia.org/wiki/Motor_Stirling#/media/File:BetaStirlingTG4web.jpg
- [7] *Motor Stirling Pistão Livre*
<https://i.ytimg.com/vi/VpZpjH71320/maxresdefault.jpg>
- [8] G. Walker, *Stirling-cycle machines*, Clarendon Press, Oxford, 1973
- [9] Kockums website
<http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/kockums.htm>
- [10] Saab website
THE STIRLING ENGINE - AN ENGINE FOR THE FUTURE
<http://saab.com/naval/submarines-and-warships/technologies/the-stirling-engine/>

- [11] A26 THE DISRUPTOR (Saab)
<http://saab.com/naval/Submarines-and-Warships/submarines/A26/>

- [12] Nightingale, Noel P., Automotive Stirling Engine: Mod 2 Ddesign Report,1986
<http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880002196.pdf>

- [13] Flynn Thomas, Cryogenic Engineering, Second Edition, Revised and Expanded, CRC Press, 2004

- [14] Stirling Ultracold History
<http://www.stirlingultracold.com/history>

- [15] Stirling Ultracold website <http://www.stirlingultracold.com/home>

- [16] Free-Piston Stirling Engine Ultra-Low Temperature Freezer
http://www.stirlingultracold.com/lib/sitefiles/pdf/10607_GLOBAL_SU780UE_Brochure_Web.pdf

- [17] Model SU105UE Compact Ultra-Low Freezer
http://www.stirlingultracold.com/lib/sitefiles/pdf/10461_GLOBAL_SU105UE_Brochure_Web.pdf

- [18] Model ULT-25NE Portable Ultra-Low Temperature Freezer
http://www.stirlingultracold.com/lib/sitefiles/pdf/10458_GLOBAL_ULT25NE_Brochure_Web.pdf

- [19] TheGreenAge - CHP Boilers
<https://www.thegreenage.co.uk/tech/chp-boilers/>

- [20] Stine, William B, Diver, Richard B., A Compendium of Solar Dish/Stirling Technology, 1994
http://www.stage-ste.eu/documents/PD%202%20Dish_Stirling%20Compendium.pdf

- [21] Envirodish and Eurodish - System and Status, 2011
https://www.researchgate.net/publication/266874849_ENVIRODISH_AND_EURODISH_-SYSTEM_AND_STATUS

- [22] EuroDish - an innovative dish Stirling/system,2002
https://www.researchgate.net/publication/282858977_EuroDish_-_an_innovative_dishStirling_system

- [23] *Envirodish and Eurodish - System and Status*, 2003
https://www.researchgate.net/publication/282859254_ENVIRODISH_AND_EURODISH_-SYSTEM_AND_STATUS

- [24] *Schlaich bergmann parter website*
<http://www.sbp.de/en/project/50-kw-dishstirling-system/>

- [25] THE STIRLING ENGINE-AN ENGINE FOR THE FUTURE

[urlhttp://saab.com/naval/Submarines-and-Warships/technologies/The-Stirling-Engine/](http://saab.com/naval/Submarines-and-Warships/technologies/The-Stirling-Engine/)

- [26] Stirling Thermal Motors inc.
<http://www.stirlingengines.org.uk/manufact/manf/usa/new2.html>

- [27] Stirling Power
<http://www.sp-usa.com/>

- [28] *Innovative Renewable Energy Solutions (INRESOL)*
<http://www.inresol.se/about/>

- [29] *INRESOL Stirling Data Sheets - V2-6 Stirling Engine*
<http://www.inresol.se/pdf/DATA%20SHEET%20V2-6.pdf>

- [30] *The Genius Portable Multi Fuel CHP Stirling Generator*
<http://www.inresol.se/the-genious-portable-multi-fuel-chp-stirling-generator/>

- [31] *The Genius Stirling Solar Tracker*
<http://www.inresol.se/the-genious-stirling-solar-tracker/>

- [32] *The Genius portable data Container - Multi Fuel CHP Stirling Generator*
http://www.inresol.se/the_inresol_stirling_chp_container/

- [33] *Cloud Industries*
<http://cloudindustries.eu/>

- [34] *INRESOL Data Sheet Catalog 2015*
<http://www.inresol.se/pdf/DATA%20SHEET%20V2-6S%20X.pdf>

- [35] *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition*
https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf

- [36] *BP Statistical Review of World Energy*, June 2016
<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2016/bp-statistical-review-of-world-energy-2016-full-report.pdf>

- [37] *Efeito fotovoltaico*
http://e-lee.ist.utl.pt/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotovoltaiques/Principes/Effet_photovoltaique.htm

- [38] *How do Photovoltaics Work?*, 2002
<https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells>

- [39] *First photovoltaic Devices*
http://www.pveducation.org/pvcdrom/manufacturing/first-photovoltaic-devices#footnote5_79nwxt3

- [40] Becquerel, A.E., *Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques*, 1839, Comptes Rendus de L'Academie des Sciences

- [41] *Photovoltaics (history)*
<http://californiasolarcenter.org/history-pv/>

- [42] *NASA Armstrong Fact Sheet: Solar-Power Research*, 2014
<https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html>

- [43] *Manufacturing Silicon*,
http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/pv_manufacturing.php

- [44] *There's a sunny future ahead for rooftop solar power: here's why*, University of New South Wales (UNSW), Janeiro 2015
<https://www.engineering.unsw.edu.au/news/there%E2%80%99s-a-sunny-future-ahead-for-rooftop-solar-power-here%E2%80%99s-why-1>

- [45] David L. Chandler, *A new dimension for solar energy*, MIT News, Março 2012
<http://news.mit.edu/2012/three-dimensional-solar-energy-0327>

- [46] Jelor Gallego, *MIT Is Building 3D Solar Towers, and So Far They Have Achieved Phenomenal Results*, Futurism, Março 2016

<https://futurism.com/mit-building-3d-solar-towers-far-achieved-phenomenal-results/>

- [47] Marco Bernardi, Nicola Ferralis, Jin H. Wan, Rachelle Villalonge, Jeffrey C. Grossman, *Energy & Environmental Science*, 2012
<http://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2012/ee/c2ee21170j#!divAbstract>
- [48] Yan Yao, Jie Yao, Vijay Kris Narasimhan, Zhichao Ruan, Chong Xie, Shanhui Fan, Yi Cui
Broadband light management using low-Q whispering gallery modes in spherical nanoshells, Nature Communications, 2012
<http://www.nature.com/articles/ncomms1664>
- [49] Andrew Meyers, *Nanoshell whispering galleries improve thin solar panels*, Stanford Engineering, 2012
<https://engineering.stanford.edu/news/nanoshell-whispering-galleries-improve-thin-solar-panels>
- [50] Matjaž Gomilšek, *Whispering gallery modes*, Novembro 2012, University of Ljubljana, Faculty of Mathematics and Physics, Eslovénia
http://mafija.fmf.uni-lj.si/seminar/files/2011_2012/wgm.pdf
- [51] Tom Beer, *Whispering galleries*, Contemporary Physics, Agosto 2006
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00107517508210812?journalCode=tcph20>
- [52] *Galp, Definição de cogeração*
<http://www.galpennergia.com/PT/investidor/ConhecerGalpEnergia/0s-nossos-negocios/Gas-Power/Power/Cogeracao/Paginas/Definicao-de-cogeracao.aspx>
- [53] Moran, Shapiro, *Fundamentals Engineering Thermodynamics*, 7th edition, John Wiley & sons, Inc. 2011
- [54] Drew Robb, *District energy for Helsinki - a highly efficient heating and cooling model*, decentralized energy, 2009
<http://www.decentralized-energy.com/articles/print/volume-10/issue-3/project-profile/district-energy-for-helsinki-a-highly-efficient-heating-and-cooling-model.html>
- [55] Danish Energy Agency, *A Progressive Way To Cogenerate Heat And Power*,
<https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/chp.pdf>

- [56] Terttu Vainio *et. al*, *High-efficiency CHP, district heating and district cooling in Finland 2010-2025*, 2015
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Art%2014%20report%20ENFinland.pdf>

- [57] C40 Cities, *Case Study: 98% of Copenhagen City Heating Supplied by Waste Heat*, 2011
http://www.c40.org/case_studies/98-of-copenhagen-city-heating-supplied-by-waste-heat

- [58] *Stirling engine domestic micro-CHP*
<http://www.open.edu/openlearn/nature-environment/the-environment/energy-buildings/content-section-3.4.1>

- [59] *Development of a pellet boiler with Stirling engine for m-CHP domestic application*
<https://energysustainsoc.springeropen.com/track/pdf/10.1186/2192-0567-1-5?site=energysustainsoc.springeropen.com>

- [60] *Diretiva 2012/27/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de outubro de 2012*
https://www.portugal2020.pt/Portal2020/Media/Default/Docs/Legislacao/Nacional/DiretivaUE2012_27.pdf

- [61] *Regulamento Delegado (UE) .../... Da Comissão de 12 de outubro de 2015*
<http://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/3/2015/PT/3-2015-6863-PT-F1-1.PDF>

- [62] *Estudo do Potencial de Cogeração de Elevada Eficiência em Portugal*
<https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/cogeracao-pt-relatorio-final.pdf>

- [63] *Entidade reguladora dos serviços energéticos ERSE*
<http://erse.pt>
 (Acedida em março 2017)

- [64] *Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG)*
<http://www.dgeg.pt/>

- [65] *Microprodução e MiniProdução: Legislação*
<http://www.renovaveisnagora.pt/web/srm/legislacao>
 (Acedido em setembro de 2016)

- [66] Decreto-Lei n.º 153/2014
http://www.renovaveisnatura.pt/c/document_library/get_file?uuid=00feb764-5a09-4bdd-b9b7-f1888c8f3e18&groupId=13360
- [67] REN: RNT e RND
<http://ren.pai.pt/ms/ms/ren-rede-electrica-nacional-sa-electricidade-1749-061-lisboa/ms-90016985-p-2/>
- [68] Portaria n.º 332/2012, de 22 de outubro
<http://energiasrenovaveis.com/images/upload/Port3222012-CIEGs.pdf>
- [69] Decreto-Lei n.º 264/2007 de 24 de julho
<https://dre.pt/application/file/a/636646>
- [70] Decreto-Lei n.º 68-A/2015, 30 de Abril
<https://dre.pt/application/file/67123417>
- [71] Declaração de Retificação 30-A/2015
<https://dre.pt/application/file/a/67614414>
- [72] Portaria n.º 140/2012
<https://dre.pt/application/file/551953>
- [73] Despacho n.º 29/2016 - Atualização trimestral da tarifa de referência da cogeração (4º trimestre de 2017)
<http://www.sctconsulting.pt/wp-content/uploads/2016/10/i014511.pdf>
- [74] Portaria n.º 173/2016, 21 de junho
<https://dre.pt/application/file/74748750>
- [75] National Renewable Energy Laboratory (NREL) website
<https://sam.nrel.gov/>
- [76] NREL - Performance Model Documentation
<https://sam.nrel.gov/performance>
- [77] NREL - Case Studies and Validation
<https://sam.nrel.gov/case-studies>

- [78] System Advisor Module (SAM) - Página de Download do programa e documento de ajuda do sistema
<https://sam.nrel.gov/download>

- [79] PVWatts Calculator (website)
<http://pvwatts.nrel.gov/>

- [80] Freeman, J., Whitmore, J., Kaffine, L., Blair, N., Dobos, A.
Validation of Multiple Tools for Flat Plate Photovoltaic Modeling Against Measured Data. National Renewable Energy Laboratory, NREL/TP-6A20-61497, 2014
<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61497.pdf>

- [81] Christensen, C.; Maguire, J.; Burch, J.; DiOrio, N.
Simplified Solar Water Heater Simulation Using a Multi-mode Tank Model. Solar 2014 Conference Presentation
https://sam.nrel.gov/system/tdf/Christensen%20Solar%202014%20070914_0.pdf?file=1&type=node&id=69521

- [82] INTRODUCTION TO WGAssociates and SOLAR DISH/STIRLING POWER SYSTEMS
<http://pointfocus.com/images/pdfs/wga.pdf>

- [83] Transient System Simulation Tool (TRNSYS) website
<http://www.trnsys.com/>

- [84] Energy Efficiency Trends and policies in Portugal, Agência para a Energia (ADENE, Outubro 2015)
<http://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-portugal.pdf>

- [85] Decreto-lei n.º 89/2006
<https://dre.pt/application/file/a/672550>

- [86] Definition of data and energy efficiency indicators in ODYSSEE data base
<http://www.odyssee-mure.eu/private/definition-indicators.pdf>

- [87] PORDATA - Consumo de energia eléctrica per capita: total e por tipo de consumo
<http://www.pordata.pt/Portugal/Consumo+de+energia+el%C3%A9ctrica+per+capita+total+e+por+tipo+de+consumo-1230>

- [88] PORDATA - Número médio de pessoas residentes nos alojamentos familiares clássicos de residência habitual segundo os Censos

<http://www.pordata.pt/Municipios/N%C3%BAmero+m%C3%A9dio+de+pessoas+residentes+nos+alojamentos+familiares+cl%C3%A1ssicos+de+resid%C3%Aancia+habitual+segundo+os+Censos-590>

- [89] *Normais Climatológicas*, Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA)
<https://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/>
- [90] *WeatherOnline - Bragança: Total de horas de Sol*
http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?LANG=pt&PLZ=____&PLZN=____&WMO=08575&CONT=ptpt&R=0&LEVEL=162®ION=0005&LAND=PO&MOD=tab&ART=SOS&NOREGION=1&FMM=1&FYY=2016&LMM=12&LYY=2016
- [91] *WeatherOnline - Coimbra: Total de horas de Sol*
<http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2015&LMM=12&LYY=2015&WMO=08548&CONT=ptpt®ION=0005&LAND=PO&ART=SOS&R=0&NOREGION=1&LEVEL=162&LANG=pt&MOD=tab>
- [92] *WeatherOnline - Évora: Total de horas de Sol*
http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?LANG=pt&PLZ=____&PLZN=____&WMO=08558&CONT=ptpt&R=0&LEVEL=162®ION=0005&LAND=PO&MOD=tab&ART=SOS&NOREGION=1&FMM=1&FYY=2016&LMM=12&LYY=2016
- [93] *WeatherOnline - Faro: Total de horas de Sol*
http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?LANG=pt&PLZ=____&PLZN=____&WMO=08554&CONT=ptpt&R=0&LEVEL=162®ION=0005&LAND=PO&MOD=tab&ART=SOS&NOREGION=1&FMM=1&FYY=2016&LMM=12&LYY=2016
- [94] *WeatherOnline - Porto: Total de horas de Sol*
<http://www.weatheronline.pt/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2012&LMM=12&LYY=2012&WMO=08545&CONT=ptpt®ION=0005&LAND=PO&ART=SOS&R=0&NOREGION=1&LEVEL=162&LANG=pt&MOD=tab>
- [95] *Gerador de Preços Portugal*
<http://www.geradordeprecos.info/>
- [96] http://www.apambiente.pt/_zdata/Instrumentos/GestaoAmbiental/EMAS/DA/63/12.pdf
- [97] <http://www.galpenenergia.com/PT/ProdutosServicos/GasNatural/Mercado-Regulado/Facturacao/Paginas/FacturaGasNatural.aspx>

- [98] <http://www.galpennergia.com/PT/ProdutosServicos/Eletricidade-Gas-Natural-Livre/Clientes-Particulares/Contrato/Faturacao/Paginas/Consumo-em-KWh-conversao-m3-para-kWh.aspx>
- [99] *Dados do modelo V2-6 sX*
<http://www.inresol.se/pdf/DATA%20SHEET%20V2-6S%20X.pdf>
- [100] *Dados técnicos do módulo fotovoltaico Axitec AC-250P/156-60S*
https://pt.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/solar_modules/Axiworldpower_AC-250-270P_156-60S_EN.pdf
- [101] *Dados técnicos dos inversores Galvo*
https://pt.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/inverter/portugal/Fronius_Galvo_PT.pdf
- [102] *temperatura de congelação*
https://www.engineeringtoolbox.com/ethylene-glycol-d_146.html
- [103] *Engineering operating guide, pg 31*
http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_010e/0901b8038010e413.pdf?filepath=/heattrans/pdfs/noreg/180-01190.pdf&fromPage=GetDoc
- [104] *Preço unitário do módulo fotovoltaico Axitec AC-250P/156-60S*
<https://www.ecosist.net/axitec-ac-250p-156-60s-250-wp.html>
- [105] *Preço Inversor Fronius Galvo 1.5-1* https://www.solar-pur.com/products/fronius-galvo-1-5-1-solar-wechselrichter?variant=34660258830&ls=pt&gclid=EAIaIQobChMI8M7H-p7Q1gIV7gDTCh00ogBaEAQYASABEgJGhfD_BwE
- [106] *Preço Inversor Fronius Galvo 2.0-1* <https://www.solar-pur.com/collections/fronius-wechselrichter/products/fronius-galvo-2-0-1-solar-wechselrichter?ls=pt>
- [107] *Preço Inversor Fronius Galvo 3.5-1* <https://www.solar-pur.com/collections/fronius-wechselrichter/products/fronius-galvo-3-0-1-solar-wechselrichter?ls=pt>
- [108] *Preço de estrutura de 6 módulos*
<https://www.ccbs-energia.pt/loja/estruturas-para-paineis/estrutura-triangular-6-pain%C3%A9is-info>

- [109] Preço de estrutura de 8 módulos
<https://www.ccbs-energia.pt/loja/estruturas-para-paineis/estrutura-triangular-8-pain%C3%A9is-info>
- [110] seguidores fotovoltaicos, pg.13)
http://www.solarcondicionado.pt/files/price-tables/Tabela_Precos_fotovoltaico_solius_2014.pdf
- [111] Tabela Geral de Preços 2013
http://www.buderus.pt/files/201307041316300.TabelaGeraldePre%C3%A7os2013_PT.pdf
- [112] Dados fornecidos por contact direto com a empresa Inresoltm
- [113] Preço de espelho solar
https://www.alibaba.com/product-detail/2mm-solar-mirror_60113358608.html?spm=a2700.7724857.main07.96.7584fc66G07J6m
- [114] Ciclo horário das tarifas <https://lojaluz.com/faq/ciclo-horario-das-tarifas-luz>
- [115] Preço do kWh da EDP
<https://lojaluz.com/preco-kwh-edp#preco-kwh-potencia-contratada>
 (Acedido em outubro 2017)
- [116] Preço omie
<http://www.omel.es/pt/inicio>
 (Acedido em novembro 2017)